



**Universidade de Aveiro**  
**Ano 2010**

Departamento de Química

**Carina Henriques  
Carvalho**

**Estudo da formação de ráfias de HDPE no  
transporte de frascos para iogurte**



**Universidade de Aveiro**  
**Ano 2010**

Departamento de Química

**Carina Henriques  
Carvalho**

**Estudo da formação de ráfias de HDPE no  
transporte de frascos para iogurte**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, realizada sob a orientação científica da Dr.<sup>a</sup> Ana Barros Timmons, Professora auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro, e da Eng.<sup>a</sup> Ana Paula Caldeira, Directora da Qualidade, Ambiente e Segurança da Logoplaste.

## **o júri**

presidente

**Prof. Dr. José Joaquim Cruz Pinto**

Professor Catedrático do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

**Prof. Dr. Artur Jorge Ferreira**

Professor Coordenador da Escola Superior e Tecnologia de Gestão de Águeda

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Ana Barros Timmons**

Professora Auxiliar do Departamento de Química da Universidade de Aveiro

**Eng.<sup>a</sup> Ana Paula Caldeira**

Directora da Qualidade, Ambiente e Segurança da Logoplaste

## **agradecimentos**

Em primeiro lugar, quero agradecer à Professora Doutora Ana Barros Timmons, orientadora interna deste trabalho, pelo apoio constante e incansável, pela enorme ajuda na resolução de problemas e pela coragem que sempre me incutiu nas fases boas e menos boas de toda a Dissertação.

À Eng.<sup>a</sup> Ana Paula Caldeira, orientadora deste trabalho na Logoplaste, e a todos os restantes colaboradores da Logoplaste que de algum modo contribuíram com o seu apoio, agradeço o facto de me terem proporcionado a realização deste trabalho e também por me terem facultado colaboração no decorrer do mesmo.

Às Professoras Doutoradas Maria João Pires da Rosa e Ana Raquel Reis Couto Xambre agradeço a imprescindível ajuda, em especial na parte referente à Gestão da Qualidade, e também pela disponibilidade e proveitosas contribuições que deram nesta Dissertação.

Ao Professor Doutor Francisco Avelino da Silva Freitas agradeço a disponibilidade e a preciosa ajuda no desenvolvimento do modelo presente nesta Dissertação.

Porque os últimos são também os primeiros, quero agradecer ao Hugo, aos meus pais e à minha irmã, o amor, a paciência, o apoio incondicional, as palavras certas que me incentivaram nos momentos mais difíceis e a confiança sempre demonstrada.

Por fim, deixo um beijo enorme a todas as amigas que estiveram comigo nesta caminhada, nas fases boas e menos boas, e que sempre me ajudaram a ultrapassar os momentos mais difíceis.

**palavras-chave**

Formação de ráfias de HDPE, Transporte pneumático de frascos, Ferramentas da qualidade

**resumo**

Esta Dissertação teve como objectivo analisar os factores que influenciam a formação de ráfias de HDPE ao longo das condutas de transporte de frascos para iogurte líquido, na fábrica Logoplaste Castelo Branco, e propor medidas para a sua minimização.

No início do trabalho procedeu-se a uma revisão da literatura sobre o transporte pneumático de partículas e os problemas de degradação subjacentes a ele, bem como sobre ferramentas da qualidade que permitissem implementar metodologias de análise e de resolução do problema em causa.

A partir do estudo acima referido, e da análise do problema na fábrica, foram identificadas possíveis causas para o problema, as quais foram organizadas recorrendo ao diagrama de causa-efeito. Em paralelo foi feito um levantamento das condições de produção numa outra fábrica da Logoplaste, em Oliveira de Azeméis, onde não se registavam problemas de formação de ráfias. A partir do diagrama causa-efeito construído, identificaram-se como potenciais causas da formação de ráfias (i) a velocidade de transporte dos frascos, a limpeza das condutas, a geometria e o número de curvas bem como a temperatura dos frascos à entrada da conduta de transporte e (ii) o coeficiente de atrito entre os materiais utilizados no fabrico dos frascos e nas condutas. As primeiras foram estudadas em fábrica e a segunda a nível laboratorial, na Universidade do Minho. Os resultados obtidos revelaram que a velocidade de transporte dos frascos, tal como era referido na literatura, é um parâmetro determinante e a sua redução conduziu à quase total eliminação da formação de ráfias. Relativamente ao efeito da limpeza das condutas, não foi possível concluir inequivocamente, se este factor é de facto determinante devido ao reduzido número de medições efectuadas. O efeito da temperatura dos frascos à entrada da conduta de transporte não se revelou significativo. No que concerne o efeito dos coeficientes de atrito, os resultados obtidos não permitiram visualizar diferenças significativas entre os frascos das fábricas de Castelo Branco e de Oliveira de Azeméis. Os coeficientes de atrito obtidos, para os diferentes materiais testados, apresentam valores muito próximos, à excepção da placa em HDPE, razão pela qual a utilização deste material nas condutas de transporte dos frascos deve ser evitada.

Por fim, tendo em conta a importância da velocidade de transporte dos frascos e a sua relação com a formação de ráfia, foi desenvolvido um modelo que permitisse estimar o tempo que os frascos demoram a percorrer o trajecto da conduta a partir do caudal de ar fornecido e das características das condutas. Com vista à determinação da queda de pressão do ar nas condutas da Logoplaste, adaptou-se a equação diferencial de Bernoulli, referente ao transporte de um gás compressível e escoamento isotérmico numa conduta. Apesar da limitação de dados, as aproximações feitas permitiram estimar o valor da queda de pressão para a conduta em estudo. Tendo em conta a escassez de informação que permitisse (i) calcular os caudais de ar reais e (ii) os valores de queda de pressão com o rigor suficiente, os parâmetros do modelo desenvolvido foram ajustados recorrendo a algumas aproximações. O tempo de transporte dos frascos estimado foi de 3,2 s, o qual apresenta um erro de 31% quando comparado com o valor medido na fábrica de 4,2s. Tendo em conta a simplicidade do modelo desenvolvido, o facto da resolução do mesmo ter sido feita utilizando valores aproximados dos caudais de ar utilizados na fábrica e o facto do cálculo da esfericidade dos frascos ser aproximada é notável a boa previsão do modelo.

**keywords**

Pneumatic transport, Formation of HDPE streamer, Quality tools

**abstract**

The aim of this thesis was to analyze the factors responsible for the formation of streamer in the pipelines for conveying bottles of liquid yogurt, at Logoplaste Castelo Branco Company, and to propose ways to minimize it.

A literature review on pneumatic transport and the problems underlying degradation of particles was initially carried out, together with a survey of Quality Assurance Tools in order to implement methodologies which could contribute to the analysis and subsequent solution of the problem.

From the study aforementioned and the analysis of the problem at the factory site the possible causes have been identified which were organized using a cause-effect diagram. In parallel, for comparison purposes, the production conditions of another factory site, in Oliveira de Azeméis where the formation of streamer does not exist, were also studied. From the cause-effect diagram it was possible to identify as potential causes for the formation of streamer: (i) velocity of the conveying bottles, the geometry and number of curves/bends, the frequency and method of cleaning of the pipelines and the temperature of the bottles at the entrance of the conveying pipe and (ii) the friction coefficient between the different materials used in the bottles and in the pipelines. The former were studied at the factory site and the latter in the laboratory at Universidade do Minho. In agreement with the literature, reduction of the conveying bottles velocity proved to be a determinant parameter as the formation of streamer was almost eliminated. As regards the effect of pipelines cleaning, in view of the limited number of measurements carried out the results are inconclusive. The effect of the temperature of the bottles at the entrance of the conveying pipe does not seem to be of major importance. The results obtained for the friction coefficients between the materials evaluated did not show any major differences except for HDPE and this is the reason why such material should not be used in these pipelines.

Finally, in view of the importance of conveying bottles velocity for the formation of streamer, a model has been developed to estimate the time required to transport the bottles across the pipeline based on the air flow rate and the characteristics of the pipeline. In order to determine the pressure drop in Logoplaste pipelines, the differential Bernoulli equation, for a compressible gas pipelines under isothermal conditions. Despite the scarcity of data, the approximations that were made allowed the estimation of the pressure drop of pipeline under study. In view of the shortage of data to calculate values for the pressure drop and for the air flow rate with reasonable accuracy, the parameters of the model developed had to be adjusted with some approximations. The estimated time of transport of bottles and the experimental one are 3,2 s and 4,2 s respectively corresponding to an error of 31%. Taking into account the simplicity of the model and the approximations involved in the calculation of the air flow rates and of the sphericity, the prediction of the model developed can be considered remarkable.

# ÍNDICE

<b>Índice.....</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de tabelas .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Nomenclatura .....</b>	<b>xviii</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. A empresa Logoplaste.....	1
1.1.1. Apresentação da Logoplaste Castelo Branco e Breve historial.....	2
1.2. Processo produtivo dos frascos para iogurte .....	2
1.2.1. Produção dos frascos .....	2
1.2.2. Sistema de transporte dos frascos.....	4
1.2.3. Sistema de limpeza das condutas e silos .....	6
1.3. Identificação do problema em estudo e estratégias de resolução .....	7
1.3.1. Identificação do problema da formação de ráfias.....	7
1.3.2. Metodologia de resolução proposta.....	9
<b>2. Revisão bibliográfica .....</b>	<b>11</b>
2.1. Plásticos.....	11
2.2. Polietileno de alta densidade .....	11
2.3. Processo moldação por extrusão-sopro.....	12
2.4. Transporte pneumático .....	13
2.4.1. Condições de transporte.....	14
2.4.2. Queda de pressão .....	15
2.4.3. Vantagens e limitações do transporte pneumático .....	18
2.5. Tribologia .....	18
2.6. Degradação de materiais .....	20
2.6.1. Causas da degradação dos materiais.....	20

2.6.2. Problemas associados à degradação dos materiais .....	23
2.7. Estratégias de minimização da degradação dos materiais.....	24
2.7.1. Ferramentas básicas da qualidade.....	25
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>31</b>
3.1. Recolha de rafia .....	31
3.1.1. Recolha de rafia referente ao caudal de ar de transporte dos frascos, em condições standard ( $V_1$ ).....	31
3.1.2. Recolha de rafia após redução do caudal de ar de transporte dos frascos ( $V_2$ ).....	31
3.2. Recolha de dados para determinação da velocidade de transporte dos frascos .....	32
3.2.1. Recolha de dados na LCB .....	33
3.2.2. Recolha de dados na LOA .....	33
3.3. Estudo do efeito da temperatura dos frascos .....	33
3.3.1. Medição da temperatura na LCB.....	33
3.3.2. Medição da temperatura na LOA .....	34
3.4. Estudo do efeito do atrito .....	35
3.4.1. Características dos provetes .....	35
3.4.2. Caracterização dos ensaios.....	36
<b>4. Resultados e discussão .....</b>	<b>37</b>
4.1. Análise do problema da formação de rafia na LCB .....	39
4.2. Estudo comparativo entre a LCB e a LOA .....	40
4.2.1. Fotografias do interior das condutas.....	42
4.3. Causas prováveis para o problema da formação de rafia .....	43
4.4. Quantificação da rafia formada .....	45
4.5. Velocidade de transporte dos frascos.....	50
4.6. Temperatura dos frascos.....	51
4.7. Coeficientes de atrito .....	52



4.8. Estado actual das condutas na fábrica LCB .....	54
4.9. Modelo para estimativa do tempo de transporte dos frascos na conduta .....	55
4.9.1. Estimativa da queda de pressão ao longo da conduta .....	55
4.9.2. Estimativa do tempo de transporte dos frascos na conduta .....	60
<b>5. Conclusões e Sugestões de trabalho futuro .....</b>	<b>65</b>
<b>Referências.....</b>	<b>67</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>71</b>
Anexo A .....	71
Anexo B .....	73
Anexo C .....	79
Anexo D .....	89

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Frascos com cabeça perdida: (a) geometria <i>Frusion</i> e (b) geometria <i>Bio</i> .....	4
Figura 1.2 – Frascos sem cabeça perdida: (a) geometria <i>Frusion</i> e (b) geometria <i>Bio</i> .....	4
Figura 1.3 – Sistema de aspiração-sopro utilizado para o envio dos frascos: (a) aspiração do frasco; (b) sopro do frasco e (c) entrada do ar proveniente do ventilador. ..	4
Figura 1.4 – Esquema da divisão de ar proveniente do ventilador: (1) ar para o transporte dos frascos e (2) ar para o transporte das cabeças perdidas. ....	5
Figura 1.5 – Configuração das condutas de transporte dos frascos.....	6
Figura 1.6 – Curva à entrada do silo de armazenamento dos frascos, (a) desacelerador em aço inox e (b) sentido do transporte dos frascos na curva. ....	6
Figura 1.7 – Equipamento de limpeza das condutas. ....	7
Figura 1.8 – Fotografia de ráfias formadas na LCB.....	8
Figura 1.9 – Ráfias no desacelerador e na parte exterior da curva de 90°, antes do silo de armazenamento dos frascos.....	8
Figura 1.10 – Fluxograma respeitante à metodologia de resolução do problema em estudo.....	10
Figura 2.1 – Representação esquemática do polietileno de alta densidade, adaptado de [5]. ....	12
Figura 2.2 – Principais etapas da moldação por extrusão-sopro: (a) extrusão da manga; (b) encapsulamento da manga; (c) inserção da agulha de sopro; (d) dilatação e refrigeração e (e) ejeção, adaptado de [5].....	13
Figura 2.3 – Elementos básicos do sistema de transporte pneumático, adaptado de [12]. ....	14
Figura 2.4 – Avaliação da queda de pressão numa curva de uma conduta, adaptado de [13].....	17
Figura 2.5 – Fluxo típico numa curva de raio longo, adaptado de [9].....	23
Figura 2.6 – Tipos de impurezas: (a) poeiras; (b) cabelos de anjo e (c) ráfias, [34].....	23
Figura 2.7 – Representação simplificada de um fluxograma, adaptado de [38].	26
Figura 2.8 – Diagrama de causa-efeito, adaptado de [38]. ....	27
Figura 2.9 – Diagrama de Pareto, adaptado de [37]. ....	28

Figura 2.10 – Histograma, adaptado de [38].....	28
Figura 2.11 – Formulário de recolha de dados, [38]. ....	29
Figura 2.12 – Gráfico dispersão: (a) com correlação positiva; (b) com correlação negativa e (c) sem correlação, adaptado de [38].....	30
Figura 2.13 – Modelo esquemático de uma carta de controlo, adaptado de [39]. .....	30
Figura 3.1 – Recipiente de recolha da ráfia. ....	31
Figura 3.2 – Pontos de cronometragem dos tempos: (a) ponto (1) e (b) ponto (2). .....	32
Figura 3.3 – Ponto de determinação da temperatura dos frascos: (a) geometria <i>Frusion</i> e (b) geometria <i>Bio</i> . ....	34
Figura 3.4 – Ponto de determinação da temperatura dos frascos. ....	34
Figura 3.5 – Proveste: (a) pino com disco e (b) base com placa. ....	35
Figura 3.6 – Tribómetro: (a) pino e (b) zona onde foi colocada a base. ....	36
Figura 3.7 – Tribómetro em funcionamento. ....	36
Figura 4.1 – Fluxograma do processo de transporte dos frascos. ....	38
Figura 4.2 – Troço recto em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos: (a) vista interior e (b) vista exterior. ....	42
Figura 4.3 – Curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos. .....	42
Figura 4.4 – Curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos. .....	42
Figura 4.5 –Troço recto PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos. ....	43
Figura 4.6 – Curva de 90° em PCV, antes do silo de armazenamento dos frascos. .....	43
Figura 4.7 – Diagrama de causa-efeito referente ao problema da formação de ráfia. ....	44
Figura 4.8 – Esquema da condução de transporte seleccionada para efectuar os testes. ....	46
Figura 4.9 – Esquema do Ventury: (1) entrada de ar proveniente do ventilador; (2) sentido da circulação de ar no Ventury e (3) tubo móvel em inox. ....	47
Figura 4.10 – Quantidade de ráfia recolhida nos dois testes realizado. ....	48
Figura 4.11 – Recipiente de recolha de ráfia. ....	48

Figura 4.12 – Poeiras formadas após a redução do caudal de ar de transporte dos frascos. ....	49
Figura 4.13 – Troço recto em PVC, antes do silos de armazenamento dos frascos. ....	54
Figura 4.14 – Curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos. ....	54
Figura 4.15 – Esquema da conduta de transporte.....	56
Figura 4.16 – Pressão do ar em cada troço da conduta.....	58
Figura 4.17 – Esquema da conduta de transporte dos frascos. ....	60
Figura 4.18 –Variação do tempo de transporte dos frascos em função do coeficiente de arrasto. ....	62
Figura 4.19 – Variação da velocidade de transporte dos frascos em função do comprimento da conduta. ....	62

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1 – Características dos ventiladores utilizados no fornecimento do ar de transporte dos frascos. ....	5
Tabela 3.1 – Materiais utilizados nos testes tribológicos. ....	35
Tabela 4.1 – Análise do problema da formação de ráfias na LCB. ....	39
Tabela 4.2 – Dados comparativos entre as fábricas Logoplaste Castelo Branco e Logoplaste Oliveira de Azeméis. ....	41
Tabela 4.3 – Resultados obtidos referentes à formação de ráfias nas condições standard ( $V_I$ ). ....	46
Tabela 4.4 – Factores controláveis e níveis, para efectuar recolha de rafia. ....	50
Tabela 4.5 – Tempo e velocidade de transporte dos frascos na conduta, antes da redução do caudal de ar de transporte dos frascos na LCB. ....	50
Tabela 4.6 – Tempo e velocidade de transporte dos frascos na conduta, após a redução do caudal de ar de transporte dos frascos na LCB. ....	51
Tabela 4.7 – Tempo e velocidade de transporte dos frascos na conduta, em condições standard na LOA. ....	51
Tabela 4.8 – Matérias-primas utilizadas no fabrico dos frascos. ....	52
Tabela 4.9 – Coeficiente de atrito cinético para cada par (placa-pino). ....	53
Tabela 4.10 – Comprimento total de cada troço da conduta e respectiva altura. ....	57
Tabela 4.11 – Pressão do ar em cada ponto da conduta. ....	58
Tabela 4.12 – Queda de pressão em cada troço da conduta e no comprimento total da mesma. ....	59
Tabela 4.13 – Parâmetros do modelo. ....	61

# NOMENCLATURA

## Símbolos

$A$	Área da secção da conduta	$m^2$
$A_p$	Área projectada do frasco	$m^2$
$C$	Velocidade do ar	$m.s^{-1}$
$C_D$	Coefficiente de arrasto	adimensional
$d$	Diâmetro da conduta	$m$
$d_f$	Diâmetro do frasco	$m$
$F$	Perda por fricção	$m^2.s^{-2}$
$F_a$	Força de atrito	$N$
$F_D$	Força de arrasto	$N$
$f_F$	Coefficiente de atrito de Fanning	adimensional
$G$	Velocidade mássica	$kg.m^{-2}.s^{-1}$
$g$	Aceleração da gravidade	$m.s^{-2}$
$h$	Altura da conduta	$m$
$h_i$	Altura da conduta no ponto i	$m$
$k$	Coefficiente de perda de curvas	adimensional
$L$	Comprimento da conduta	$m$
$L_e$	Comprimento equivalente	$m$
$L_f$	Comprimento do frasco	$m$
$L_i$	Comprimento da conduta no ponto i	$m$
$M_w$	Massa molecular do ar	$kg.mol^{-1}$
$m$	Massa do frasco	$kg$
$p$	Pressão do ar	$Pa$
$p_A$	Pressão do ar à entrada da conduta	$Pa$
$p_B$	Pressão do ar à saída da conduta	$Pa$
$p_{bf}$	Pressão na base do frasco	$Pa$
$p_{tf}$	Pressão no topo do frasco	$Pa$
$p_i$	Pressão do ar no ponto i	$Pa$
$R$	Constante dos gases perfeitos	$Pa.m^3.K^{-1}.mol^{-1}$
$Re$	Número de Reynolds	adimensional
$R_B$	Raio de curvatura da curva	$m$
$T$	Temperatura do ar	$K$
$t$	Tempo	$s$
$u$	Velocidade média do ar	$m.s^{-1}$
$v$	Velocidade de transporte dos frascos	$m.s^{-1}$
$v_{ar}$	Velocidade do ar	$m.s^{-1}$
$\dot{V}$	Caudal volumétrico de ar	$m^3.s^{-1}$
$\dot{V}_s$	Caudal volumétrico de ar à saída do ventilador	$m^3.s^{-1}$
$W$	Força normal	$N$

$\Delta$	Variação	adimensional
$\epsilon$	Rugosidade	mm
$\mu$	Coefficiente de atrito	adimensional
$\mu_{ar}$	Viscosidade do ar	$\text{Pa.s}^{-1}$
$\pi$	Pi	adimensional
$\rho$	Densidade do ar	$\text{kg.m}^{-3}$

## Abreviaturas

DOE	Desenho de Experiências
$V_1$	Caudal de ar de transporte dos frascos, em condições standard
$V_2$	Caudal de ar de transporte dos frascos, após redução do mesmo
EBM	Moldação por extrusão-sopro (do inglês <i>extrusion blow molding</i> )
HDPE	Polietileno de alta densidade
LCB	Logoplaste Castelo Branco
LOA	Logoplaste Oliveira de Azeméis
PE	Polietileno
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinilo
R	Recuperado

### 1.1.1. *Apresentação da Logoplaste Castelo Branco e Breve historial*

A Logoplaste Castelo Branco, anteriormente designada por Brancoplaste, é uma das fábricas que faz parte do grupo industrial Logoplaste, em Portugal. A Logoplaste Castelo Branco (LCB) iniciou a laboração em 1994 para a Danone, quando esta transferiu de Barcelona para Castelo Branco a referência *DAN'UP*, centrando nesta fábrica a produção para Portugal e Espanha. Actualmente, a LCB dedica-se ao fabrico de frascos para iogurte líquido apenas com geometria *Frusion*, no entanto, até Abril deste ano os frascos eram fabricados com duas geometrias: *Bio* e *Frusion*.

Desde a sua fundação, a LCB tem-se empenhado na constante modernização e ampliação das instalações industriais. Inicialmente, em 1994, existiam apenas duas máquinas extrusão-sopro com uma capacidade de 5000 frascos por hora e 218 m<sup>2</sup> de área coberta. Presentemente a fábrica dispõe de sete máquinas de extrusão-sopro, uma capacidade de 34500 frascos por hora e uma área coberta de 580 m<sup>2</sup>.

Esta fábrica encontra-se estruturada de acordo com as normas NP EN ISO 9001:2008 e NP EN ISO 22000:2005, sendo certificada apenas pela última.

## 1.2. Processo produtivo dos frascos para iogurte

Para o fabrico dos frascos para iogurte são utilizadas duas matérias-primas, o polietileno de alta densidade (HDPE) e um aditivo, matéria-prima principal e matéria-prima secundária, respectivamente. O processo utilizado no fabrico dos frascos é o de moldação por extrusão-sopro.

### 1.2.1. *Produção dos frascos*

O processo produtivo dos frascos começa na recepção e armazenamento das duas matérias-primas. O HDPE é transportado até à fábrica em cisterna, na forma de grânulos (ou *pellets*), sendo depois descarregado para os silos de armazenamento utilizando condutas em aço inox, através de ar pressurizado. Os valores máximos de temperatura e pressão durante a descarga, 70°C e 0.9 bar respectivamente, devem ser os recomendados



pelo fabricante da matéria-prima. O cumprimento destes valores visa reduzir a possibilidade de degradação das *pellets* de HDPE e a consequente formação de poeiras ou ráfias<sup>1</sup>, dependendo das condições de descarga e/ou transporte [1]. O aditivo é composto por um concentrado de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) em polietileno (polímero base), e encontra-se armazenado na fábrica em embalagens de 25 kg.

Após a recepção e armazenamento da matéria-prima principal esta é enviada, através de condutas em aço inox, utilizando transporte pneumático sob vácuo, para um doseador onde, além das *pellets* de HDPE, provenientes dos silos de matéria-prima, são adicionados HDPE triturado ( $\pm 35\%$ ), oriundo do moinho de recuperação dos excedentes do processo e das cabeças perdidas, e o aditivo (1%). De seguida, esta mistura é transportada, sob vácuo, até duas tremonhas de distribuição a partir das quais são alimentadas as máquinas do processo. Neste ponto começa o processo de extrusão-sopro, através do qual os frascos são fabricados com o formato pretendido. No final do processo todos os frascos encontram-se fechados, sendo designados por frascos com cabeça perdida (Figura 1.1). A gama de temperatura do processo de extrusão-sopro varia entre os 180 e os 190°C.

Findo o processo de extrusão-sopro, procede-se ao corte das cabeças perdidas numa máquina de corte, com a acção de uma lâmina de corte. Em seguida, os frascos passam pela testadora (máquina que testa a existência de frascos com furos através de um sopro de ar) e são enviados sem cabeça perdida (Figura 1.2) para os silos de armazenamento (silos do cliente – Danone). Desde Março de 2010 que todos os frascos são enviados abertos, ou seja sem cabeça perdida, para os silos de armazenamento, porém anteriormente alguns frascos eram enviados fechados. Nesse caso, o corte das cabeças perdidas era efectuado na fábrica da Danone, no entanto devido a alterações efectuadas nesta o corte passou a efectuar-se exclusivamente na LCB.

---

<sup>1</sup> O termo “ráfias” pode também ter outras designações tais como “cabelo de anjo”, “fitas” ou “pele de cobra”



**(a)**



**(b)**

**Figura 1.1 – Frascos com cabeça perdida: (a) geometria *Frusion* e (b) geometria *Bio*.**



**(a)**

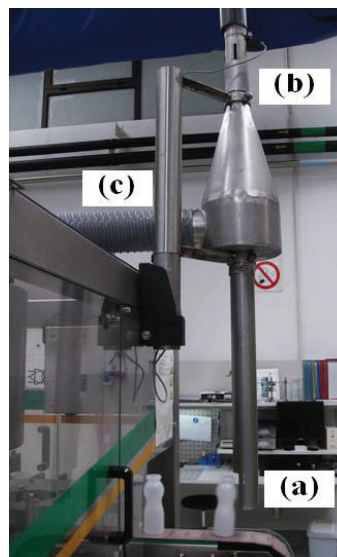


**(b)**

**Figura 1.2 – Frascos sem cabeça perdida: (a) geometria *Frusion* e (b) geometria *Bio*.**

### *1.2.2. Sistema de transporte dos frascos*

O transporte dos frascos para os silos é feito, em ambas as geometrias, usando o sistema aspiração-sopro (Figura 1.3), através de um Ventury. Este sistema consiste na aspiração do frasco desde a saída do tapete de transporte (ponto *(a)* – Figura 1.3) até ao Ventury e sopro do frasco desde a saída do Ventury (ponto *(b)* – Figura 1.3) até ao silo de armazenamento, utilizando para isso ar proveniente de um ventilador (ponto *(c)* – Figura 1.3).

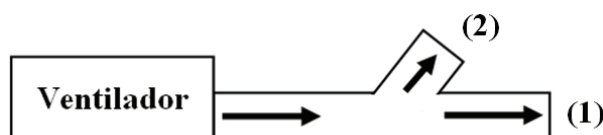


**Figura 1.3 – Sistema de aspiração-sopro utilizado para o envio dos frascos: (a) aspiração do frasco; (b) sopro do frasco e (c) entrada do ar proveniente do ventilador.**

As características dos ventiladores utilizados estão apresentadas na Tabela 1.1. O caudal de ar que sai do ventilador não é utilizado apenas para o envio dos frascos, uma vez que parte dele é utilizado para o envio das cabeças perdidas, tal como se encontra esquematizado na Figura 1.4.

**Tabela 1.1 – Características dos ventiladores utilizados no fornecimento do ar de transporte dos frascos.**

Modelo	Caudal volumétrico (m <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup> )	Quantidade
AP 602	6	4
AP 604	10	1



**Figura 1.4 – Esquema da divisão de ar proveniente do ventilador: (1) ar para o transporte dos frascos e (2) ar para o transporte das cabeças perdidas.**

Anteriormente, quando a cadência de envio dos frascos era inferior (1250/h), o sistema de envio era impulsão-sopro mas com o aumento da quantidade de frascos fabricados, em 2002, este sistema tornou-se inviável, devido a constantes entupimentos na linha de transporte, sendo então alterado para o sistema aspiração-sopro.

Actualmente, para efectuar o transporte dos frascos existem oito condutas, com as configurações esquematizadas na Figura 1.5. Ao longo de cada conduta existem várias curvas com diferentes características, existindo também um desacelerador em aço inox que tem a função de reduzir a velocidade dos fracos antes da entrada na curva que antecede o silo de armazenamento (Figura 1.6). Cada conduta, além de troços posicionados na vertical e horizontal, possui também um troço com inclinação (30° aproximadamente). A distância máxima de transporte dos frascos, desde o Ventury até aos silos de armazenamento, é de aproximadamente 50 m. As condutas actuais (PVC) foram instaladas em 2007, sendo que até então eram em polietileno (PE).

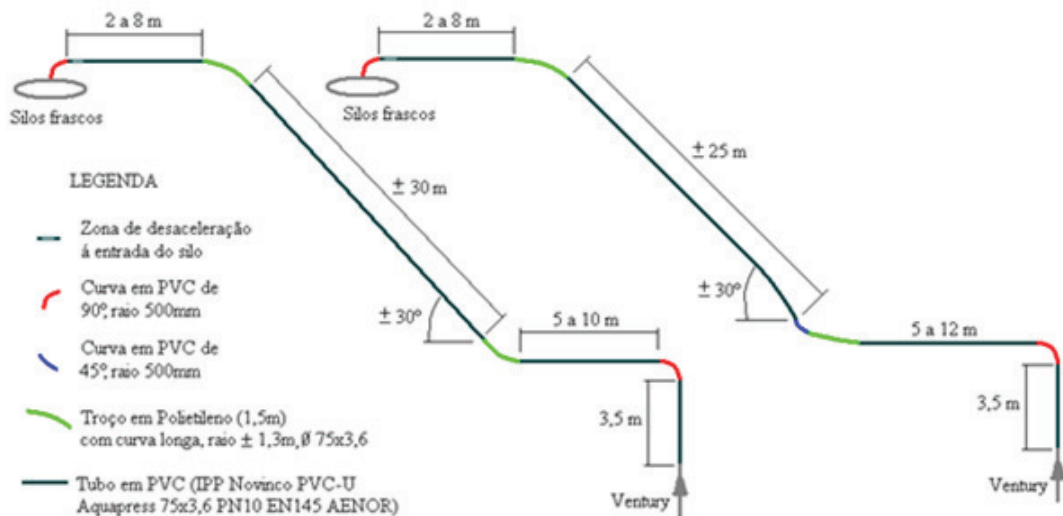


Figura 1.5 – Configuração das condutas de transporte dos frascos.

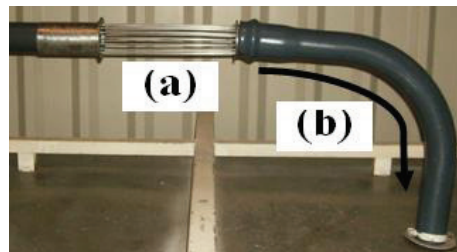


Figura 1.6 – Curva à entrada do silo de armazenamento dos frascos, (a) desacelerador em aço inox e (b) sentido do transporte dos frascos na curva.

### 1.2.3. Sistema de limpeza das condutas e silos

Devido à constante formação de ráfias no interior das condutas de transporte dos frascos é necessário proceder à limpeza, tanto destas como dos silos onde os frascos são armazenados para posteriormente seguirem para a linha da Danone. A limpeza das condutas é da responsabilidade da LCB no entanto, a limpeza dos silos é do encargo da Danone.

Para proceder à limpeza das condutas é inevitável que o sistema de transporte seja interrompido, ou seja que não haja envio de frascos nesse momento, o que implica que a produção de frascos esteja suspensa. A limpeza é feita utilizando um equipamento específico para limpeza de condutas (Figura 1.7). Este equipamento consiste num escovilhão abrasivo em rotação que percorre lentamente cada conduta. Posteriormente, as condutas são sopradas utilizando ar proveniente dos ventiladores, para limpeza dos

resíduos libertados. Esta operação é realizada semestralmente com uma duração de cerca de 30 minutos por conduta.



Figura 1.7 – Equipamento de limpeza das condutas.

### 1.3. Identificação do problema em estudo e estratégias de resolução

#### 1.3.1. *Identificação do problema da formação de ráfias*

Durante o transporte dos frascos para iogurte através de condutas, utilizando transporte pneumático, até aos silos onde os frascos são armazenados ocorre, desde há alguns anos, a formação de impurezas (poeiras e/ou ráfias).

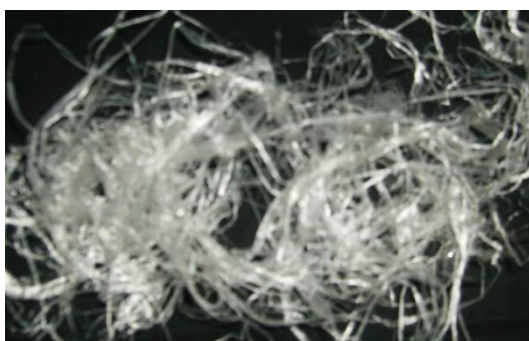
A primeira detecção de ráfias, associada ao transporte dos frascos ao longo das condutas, ocorreu em 2005, após a descontinuação do corante (Masterbatch – matéria-prima secundária). Até então o Masterbatch era utilizado para conferir cor/opacidade (cor branca brilhante) aos frascos. No entanto, com o arranque nesse ano de rótulos retrácteis, que cobriam a totalidade dos frascos, foi retirada a coloração aos mesmos e o Masterbatch foi removido. Na sua composição, o Masterbatch possuía o polietileno de baixa densidade (polímero base) e o rutilio (um dos três polimorfos do dióxido de titânio –  $\text{TiO}_2$ ). O  $\text{TiO}_2$  é um pigmento branco, quimicamente inerte e termicamente estável, possuindo alto teor de reflectância e opacidade. A descontinuação do Masterbatch trouxe problemas acrescidos ao processo de fabrico dos frascos, registando-se em algumas máquinas de extrusão-sopro variações no comprimento da manga<sup>2</sup>, as quais foram solucionadas adicionando à matéria-

<sup>2</sup> Tubo suspenso do polímero fundido por extrusão.

prima principal um aditivo (concentrado de carbonato de cálcio em polietileno). No entanto, o problema da formação de ráfias não foi resolvido.

Em 2006, e com o intuito de minimizar a formação de poeiras e/ou ráfias nas condutas de transporte dos frascos, reiniciou-se a produção de frascos com cor. Por coincidência, na mesma semana foram detectados frascos, na linha de enchimento da Danone, com deficiente colagem da tampa, pelo que a pedido do cliente o corante foi de novo retirado.

Devido à constante formação de poeiras e/ou ráfias, em 2007, as condutas de PE, utilizadas para o transporte dos frascos, foram substituídas por PVC. Após a substituição das condutas o problema da formação de ráfias continuava a não estar resolvido, sendo que as ráfias passaram a ter maiores dimensões e maior quantidade ao longo das condutas. As figuras 1.8 e 1.9 mostram as ráfias formadas ao longo das condutas de transporte dos frascos.



**Figura 1.8 – Fotografia de ráfias formadas na LCB.**



**Figura 1.9 – Ráfias no desacelerador e na parte exterior da curva de 90°, antes do silo de armazenamento dos frascos.**

Devido à formação de ráfias durante o transporte dos frascos nas condutas existe a possibilidade de essas entrarem nos silos de armazenamento ou até mesmo nos frascos. Os frascos, depois de armazenados nos silos, saem pela abertura inferior destes e são enviados, através de tapetes, para a linha da Danone onde são ordenados na vertical e desinfetados com peróxido de hidrogénio (desinfecção microbiológica), antes de serem enchidos com o iogurte. Como os frascos, após os tapetes, são colocados na vertical e a única limpeza a que são sujeitos é a desinfecção microbiológica, caso as ráfias se encontrem no interior dos frascos, estes serão enchidos com este corpo estranho. A formação de impurezas tornou-se um problema mais importante visto que os frascos passaram a ser transportados abertos

(sem cabeça perdida). A eliminação da formação de ráfias visa reduzir o risco de contaminação física dos frascos para iogurte no âmbito da segurança alimentar (NP EN ISO 22000:2005).

O objectivo desta Dissertação consiste em avaliar o comportamento dos frascos na fase de transporte, a sua interacção com os materiais de contacto e, actuar ao nível das infra-estruturas existentes e dos materiais utilizados visando eliminar a degradação dos frascos e consequente formação de ráfias.

### 1.3.2. *Metodologia de resolução proposta*

Através do estudo da formação de ráfias, recorrendo a fontes bibliográficas, identificaram-se possíveis causas para este problema. A informação disponível na bibliografia refere-se sobretudo a partículas, nomeadamente na forma de *pellets* para o caso de materiais poliméricos. No entanto, para o presente estudo considerou-se os frascos como sendo partículas grandes, pois não foi possível encontrar referências bibliográficas respeitantes a frascos para iogurte ou materiais que se assemelhem a eles.

Tendo em conta que inicialmente não existiam quaisquer dados quantitativos referentes à formação de ráfias na LCB, recorreu-se a ferramentas da qualidade com o objectivo de ajudar na metodologia de resolução do problema. Assim, elaborou-se um diagrama de causa-efeito, onde se apresentam as possíveis causas para o problema em estudo. A identificação destas causas teve como base a informação recolhida nas fontes bibliográficas, o levantamento do problema na fábrica e também o conhecimento do problema em outras fábricas da Logoplaste, nomeadamente na Logoplaste Oliveira de Azeméis (LOA). Das causas apresentadas neste diagrama foram seleccionadas as que poderiam ter maior influência sobre o problema e foram propostos alguns testes a serem realizados na fábrica com o intuito de recolher valores quantitativos referentes à formação de ráfias, que seriam indispensáveis no tratamento de dados. Além dos testes referidos anteriormente, foram também identificados ensaios a realizar em laboratório a fim de se determinar os coeficientes de atrito entre a superfície externa dos frascos e a superfície interna das condutas, em diversas situações. Após recolha e tratamento dos dados, propôs-se uma solução que melhor se adequasse ao problema da fábrica, ou seja, que minimizasse



a formação de ráfias durante o transporte dos frascos para iogurte, sem alterações drásticas nas instalações e nos procedimentos.

Seguidamente, explorou-se o desenvolvimento de um modelo que possa vir a ser utilizado com vista a melhorias futuras, nomeadamente no que concerne à queda de pressão ao longo das condutas de transporte dos frascos e à velocidade de transporte destes ao longo das mesmas.

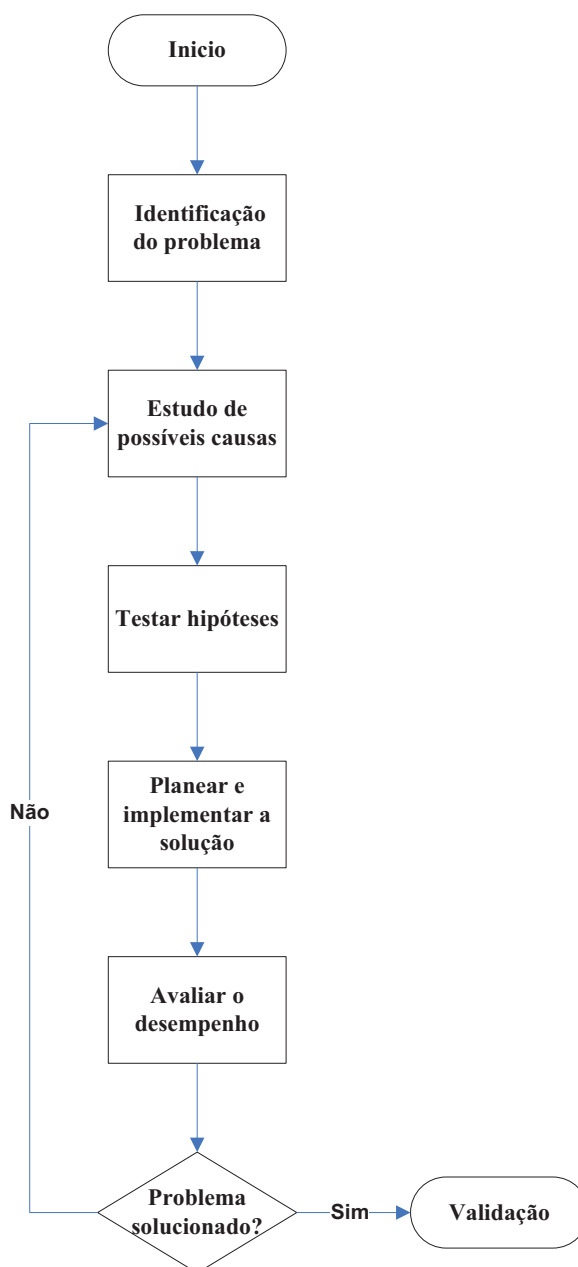


Figura 1.10 – Fluxograma respeitante à metodologia de resolução do problema em estudo.



## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Plásticos**

Os plásticos têm grande importância no cotidiano. Uma das razões para a grande popularidade do plástico, numa ampla variedade de aplicações industriais, é devida às suas propriedades apresentarem enorme diversidade e à sua facilidade de processamento. As propriedades dos plásticos podem ser adaptadas para atender a necessidades específicas, alterando determinados parâmetros tais como a composição atômica da estrutura de repetição, o peso molecular, a flexibilidade e o grau de cristalinidade [2-3]. O termo “plásticos” é habitualmente usado para designar materiais à base de polímeros sintéticos ou naturais modificados, que podem ser moldados pela acção do calor e/ou pressão [3].

Na classificação geral dos polímeros existem duas categorias geralmente aceites: as resinas termoplásticas e as resinas termofixas [3]. As primeiras consistem em cadeias de polímero de elevado peso molecular que não se encontram ligadas entre si e que podem existir numa estrutura linear ou ramificada. Após aquecimento de um termoplástico, é formado um líquido altamente viscoso de tal modo que pode ser moldado utilizando equipamentos de processamento de plásticos. As resinas termofixas têm todas as cadeias ligadas entre si através de ligações covalentes formando uma rede reticulada. Estas resinas, ao contrário das resinas termoplásticas, não podem ser reprocessadas [2-3]. Como exemplos de resinas termoplásticas tem-se o polipropileno (PP), o polietileno de alta densidade (HDPE), o polietileno de baixa densidade (LDPE), o policloreto de vinilo (PVC), entre outras. No caso das resinas termofixas, os exemplos mais comuns incluem as resinas fenólicas, as epóxi, os poliuretanos, entre outras. Cerca de 85% das resinas produzidas são termoplásticas [4].

### **2.2. Polietileno de alta densidade**

Em 1898, o químico alemão Hans von Pechmann observou um precipitado ao trabalhar com uma forma de metano em éter. Dois anos depois, os químicos alemães Eugen Bamberger e Friedrich Tschirner identificaram este composto como polimetileno, que seria algo muito próximo do polietileno [5]. Em 1953, Karl Ziegler e

Erhard Holzkamp descobriram o polietileno de alta densidade (HDPE). O processo incluiu o uso de catalisadores e baixa pressão, que é a base para a formulação de muitas variedades de compostos de polietileno [5-6].

Quimicamente, o HDPE é o polímero mais próximo da estrutura do polietileno puro, sendo constituído principalmente por cadeias lineares. O polietileno de alta densidade é um material termoplástico altamente cristalino (acima de 90%), pois possui um baixo teor de ramificações. Este polímero apresenta uma temperatura de fusão cristalina de aproximadamente 132°C e densidade entre 0,95 e 0,97 g.cm<sup>-3</sup> [5]. A sua estrutura encontra-se esquematizada na Figura 2.1.



**Figura 2.1 – Representação esquemática do polietileno de alta densidade, adaptado de [5].**

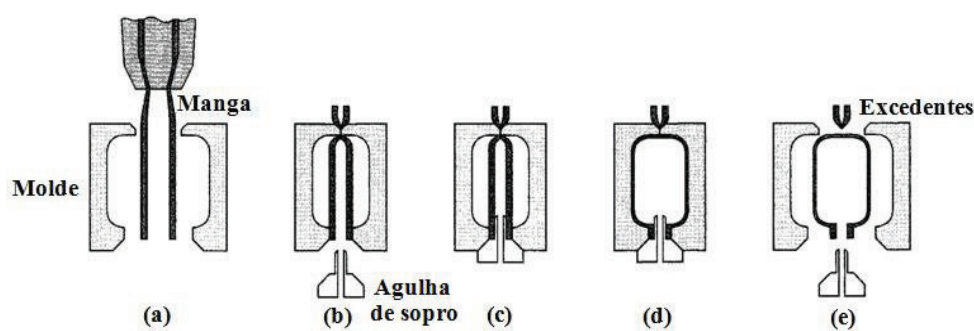
O polietileno de alta densidade é utilizado em diferentes segmentos da indústria de transformação de plásticos, tais como os processamentos por extrusão, moldação por sopro ou por injeção. O método mais comum de processamento do HDPE é a moldação por sopro [2, 7].

### 2.3. Processo moldação por extrusão-sopro

Existem três processos principais utilizados pela indústria de moldação por sopro para a produção de embalagens e produtos ocos: moldação por extrusão-sopro (processo mais comum), moldação por injeção-sopro e moldação por extensão-sopro [8]. Em seguida apenas se discute o processo de moldação por extrusão-sopro pois este é o processo utilizado pela Logoplaste Castelo Branco para o fabrico dos frascos para iogurte.

O processo moldação por extrusão-sopro (EBM) é usado para produzir peças grandes, irregulares e ocas numa única operação [8]. Este processo consiste basicamente na preparação de um tubo suspenso do polímero fundido por extrusão designado por manga (ou *parison*). Logo que a manga tenha atingido o tamanho pré-determinado, o

molde é envolvido em torno dela, a cabeça da extrusora recua e o tubo é selado. A agulha de sopro é então inserida, e um sopro de ar enche a manga até esta se adaptar ao interior do molde. O molde permanece fechado até ao polímero solidificar. Seguidamente o molde é aberto e o produto é ejectado. Como etapa final poderá ser necessário remover alguns excedentes (*pinch-off*) do objecto fabricado, quer simultaneamente com a ejeção ou numa etapa separada. Posteriormente, o material *pinch-off* é moído e reciclado directamente para a alimentação da extrusora [5, 8]. Este processo permite altas taxas de produção [3]. As principais etapas envolvidas no processo de moldação por extrusão-sopro encontram-se ilustradas esquematicamente na Figura 2.2.



**Figura 2.2 – Principais etapas da moldação por extrusão-sopro: (a) extrusão da manga; (b) encapsulamento da manga; (c) inserção da agulha de sopro; (d) dilatação e refrigeração e (e) ejeção, adaptado de [5].**

## 2.4. Transporte pneumático

O transporte pneumático pode ser definido como o arrasto de partículas sólidas por uma corrente gasosa ao longo de uma conduta. A primeira grande aplicação de transporte pneumático foi o transporte sob vácuo de grãos no final do século XIX. A partir daí o uso deste sistema de transporte cresceu bastante sendo presentemente utilizado, com sucesso, em diversas indústrias (química, agrícola, farmacêutica, plásticos, alimentos, entre outras) [9-10] .

A informação disponível na literatura, sobre transporte pneumático, é sobretudo alusiva a partículas de pequenas dimensões e/ou grânulos. Para outros tipos de materiais a informação disponibilizada é maioritariamente sob a forma de patentes. Estes factos levaram a que se considerasse os frascos como partículas de grandes dimensões, efectuando as analogias possíveis.

Os sistemas de transporte pneumático são muito simples e eminentemente adequados para o transporte de materiais em pó e granular. Estes sistemas de transporte requerem uma fonte de gás comprimido, geralmente ar, um dispositivo de alimentação, uma conduta de transporte, um receptor (geralmente um silo) onde os materiais serão armazenados e um sistema de separação gás-sólido [11], tal como ilustrada a Figura 2.3.

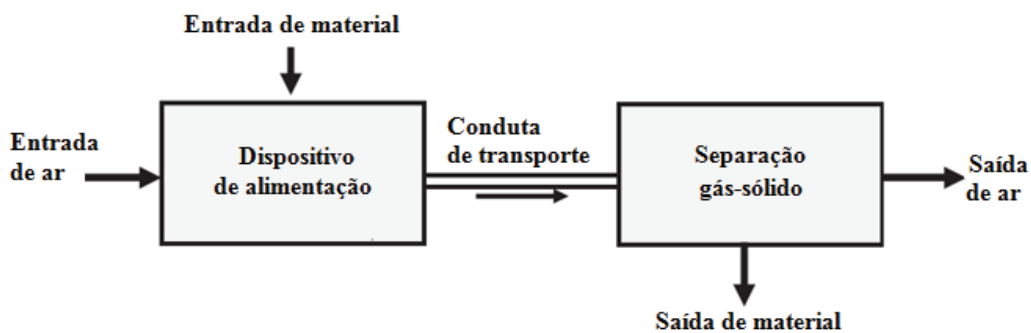


Figura 2.3 – Elementos básicos do sistema de transporte pneumático, adaptado de [12].

#### 2.4.1. *Condições de transporte*

A selecção de um ventilador ou compressor é provavelmente uma das decisões mais importantes a serem feitas no projecto de um sistema de transporte pneumático. A classificação destes equipamentos é expressa em termos de pressão de alimentação requerida e de caudal volumétrico de ar ( $\dot{V}$ ) debitado.

A pressão de alimentação requerida depende essencialmente da queda de pressão existente ao longo do comprimento da conduta de transporte. O caudal volumétrico de ar depende da combinação da velocidade requerida para o transporte do material e do diâmetro da conduta a ser usado. Uma vez que o ar é compressível, no caso de uma conduta de diâmetro único, o caudal volumétrico vai aumentar gradualmente desde o ponto de alimentação, até ao ponto de descargo do material. Por este motivo, a velocidade do ar de transporte também aumentará ao longo do comprimento da mesma e portanto terá sempre um valor mínimo no ponto de alimentação do material. A velocidade do ar é um parâmetro muito importante e precisa de ser controlada com bastante precisão. De sublinhar que, o ar no início da linha de transporte está sempre a uma pressão superior do que no final da linha devido à queda de pressão necessária para o transporte do ar e das partículas.

Além dos parâmetros referidos anteriormente, a velocidade de transporte das partículas tem também extrema importância no transporte pneumático. No entanto, medir a velocidade das partículas é um processo difícil e complexo e, à exceção de estudos de investigação, a velocidade das partículas raramente é medida, sendo apenas referida a velocidade do ar. O valor da velocidade das partículas depende do seu tamanho, forma e densidade, e portanto o valor pode variar numa gama extremamente ampla [13]. Esta velocidade aumenta com o aumento da velocidade do ar [14].

A taxa de carga de partículas é um parâmetro útil para avaliar o escoamento de partículas ao longo de uma conduta, independentemente das suas características. Esta taxa é a razão entre o caudal mássico do material transportado e o caudal mássico de ar utilizado para o transporte do material. Uma característica particularmente útil deste parâmetro é que o seu valor permanece essencialmente constante ao longo de uma conduta, ao contrário da velocidade e do caudal volumétrico de ar que se alteram constantemente, tal como referido anteriormente [13].

Para um dado sistema, o valor da pressão do ventilador ou compressor, que é usado para fornecer o ar, é quem determina o quanto e em que medida o material pode ser transportado num dado diâmetro da conduta. Se um ventilador ou compressor é especificado incorrectamente, tanto em termos de pressão como em termos de caudal volumétrico, a conduta é susceptível de bloqueio [13].

#### *2.4.2. Queda de pressão*

A queda de pressão numa conduta diz respeito à dificuldade do fluído em escoar dentro da mesma. É relativamente simples calcular a queda de pressão quando há somente um fluxo gasoso, mas incluir o efeito dos sólidos transportados é consideravelmente mais complicado. Até ao momento, tem sido feito muito trabalho para prever analiticamente a queda de pressão, mas há ainda uma disparidade significativa entre os vários modelos. Os modelos desenvolvidos para determinar com rigor a queda de pressão usam dados experimentais e relacionam-nos com os parâmetros físicos e dimensionais do material a transportar, assim como com as características da conduta. Além disso, os modelos existentes concentram-se no estudo de partículas na forma de poeiras ou grânulos [15].

A queda de pressão numa conduta vazia, ou seja onde apenas se considera o transporte de ar, é uma consideração importante no projecto de um sistema de transporte pneumático. A capacidade deste tipo de sistema de transporte, em termos de conseguir transportar determinado caudal de material, depende essencialmente da queda de pressão disponível e do diâmetro da conduta. A queda de pressão total é fortemente afectada pela velocidade do ar e de uma infinidade de propriedades associadas ao material transportado, assim como pela presença de curvas ao longo da conduta [13].

A queda de pressão da conduta em linha recta, independentemente da sua orientação, é obtida em termos de coeficiente de atrito da conduta, sendo calculada pela seguinte equação:

$$\Delta p = \frac{4f_F L}{d} \times \frac{\rho C^2}{2} \text{ (N.m}^{-2}\text{)} \quad 2.1$$

Onde  $\Delta p$  é a queda de pressão (N.m<sup>-2</sup>),  $f_F$  o coeficiente de atrito de Fanning (adimensional),  $L$  o comprimento da conduta (m),  $\rho$  a densidade do ar (kg.m<sup>-3</sup>),  $C$  a velocidade do ar (m.s<sup>-1</sup>) e  $d$  o diâmetro da conduta (m). Neste caso, a queda da pressão é proporcional ao quadrado da velocidade e assim o caudal de ar terá um efeito muito significativo na queda de pressão na linha de transporte, tal como sucede com o comprimento da conduta. A queda de pressão é inversamente proporcional ao diâmetro da conduta e essa só reduz com o aumento deste parâmetro.

A queda de pressão das curvas (equação 2.2), presentes nas condutas de transporte, é obtida em termos de um coeficiente de perda.

$$\Delta p = k \times \frac{\rho C^2}{2} \text{ (N.m}^{-2}\text{)} \quad 2.2$$

onde  $k$  depende da geometria e da configuração de determinada curva. A queda de pressão numa curva vai depender da relação entre o raio de curvatura e o diâmetro da conduta e da rugosidade da superfície. A queda de pressão das curvas pode ser determinada em termos do comprimento equivalente, isto é, que produz a mesma queda de pressão da curva (é o chamado comprimento equivalente (equação 2.3)) [13].

$$L_e = \frac{k d}{4f_F} \text{ (m)} \quad 2.3$$

Para a determinação da queda de pressão total do sistema de transporte, faz-se o somatório das contribuições anteriores, respeitantes à queda de pressão da conduta em linha recta e das curvas (equação 2.4).

$$\Delta p = \left( \frac{4f_F L}{d} + \sum k \right) \times \frac{\rho C^2}{2} \text{ (N.m}^{-2}\text{)} \quad 2.4$$

Devido à mudança de direcção, ao impacto das partículas contra as paredes das curvas e turbulência geral haverá uma queda de pressão através de cada curva em qualquer conduta, o que provoca a desaceleração do material transportado. A queda de pressão provocada pela curva não ocorre apenas na curva em si, mas também na secção recta a jusante à curva (Figura 2.4). À saída da curva, a velocidade das partículas é menor do que à entrada e assim elas terão de ser re-aceleradas. O elemento principal da queda de pressão é devido à re-aceleração das partículas de volta à sua velocidade depois da saída da curva. Este elemento da queda de pressão é geralmente incorporado na perda global associada a uma curva. Um aumento do número de curvas irá também causar um aumento na queda de pressão, o que pode ser prejudicial para o desempenho global do sistema de transporte.

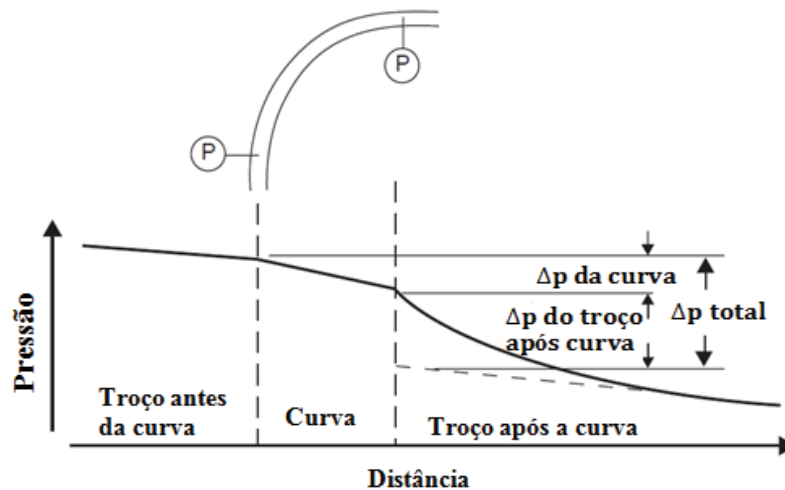


Figura 2.4 – Avaliação da queda de pressão numa curva de uma conduta, adaptado de [13].

Em termos de desempenho da conduta de transporte, tal como referido anteriormente, as curvas têm um efeito muito significativo. Este efeito pode ser devido ao número de curvas, à sua geometria e à sua localização. No entanto, é também possível que o tipo de material transportado tenha um efeito significativo, assim como os parâmetros de transporte.

#### 2.4.3. *Vantagens e limitações do transporte pneumático*

A utilização do ar para o transporte de materiais apresenta vantagens quando comparado com o transporte mecânico. Devido à flexibilidade de instalação, este modo de transporte de sólidos a granel é usado especialmente para distribuir os materiais através de condutas para áreas remotas das fábricas que seriam difíceis de atingir economicamente com transportadores mecânicos. Além disso, uma vez que estes são completamente fechados, a contaminação do produto, perda de material e emissão de poeiras (poluição ambiental) são reduzidos ou eliminados, oferecendo assim maior segurança ao produto [16].

Embora o transporte pneumático seja utilizado cada vez mais, existem ainda muitos problemas importantes dificultando o seu emprego numa maior gama de aplicações industriais. Este sistema de transporte, como qualquer processo de engenharia, deve ser projectado para o uso mais eficiente da energia. Embora a tecnologia a adoptar seja simples, existem várias precauções que devem ser respeitadas com o intuito do material transportado ser entregue ao cliente nas condições estabelecidas, assim como ter em atenção o consumo energético por parte do fornecedor. Efectuar o transporte do material com velocidades elevadas não só aumenta os custos energéticos, mas pode também reduzir o tempo de vida das linhas de transporte e provocar alterações no tamanho do material. Os projectistas destes sistemas são confrontados com o desafio de garantir uma velocidade de transporte do material confiável tendo em atenção estas questões [17].

### 2.5. Tribologia

A palavra Tribologia deriva da palavra grega *tribos* que significa atrito e inclui, para além deste, outros aspectos como o desgaste e a lubrificação. Um sistema tribológico consiste nas superfícies de dois componentes que se encontram em contacto móvel um com o outro e com a área adjacente [18-19].

A principal causa de desperdício de material e perda de desempenho mecânico é o desgaste e qualquer redução no desgaste pode resultar em economias consideráveis. O desgaste ocorre como consequência natural do deslizamento entre duas superfícies em contacto e define-se vulgarmente como a perda progressiva de material numa superfície



em movimento relativo devido a acções mecânicas ou químicas. O atrito é a principal causa de desgaste e de dissipação de energia. Poupanças consideráveis podem ser feitas pelo controle melhorado do atrito. A lubrificação é um meio eficaz de controlar o desgaste e reduzir atrito [19].

O atrito é resistência ao movimento de um corpo sólido sobre ou ao longo de outro. Enquanto geralmente se procura reduzir o desgaste ao mínimo, dado que ele representa uma perda de eficiência e de material, no que diz respeito ao atrito, tem-se duas hipóteses. Em certos casos, procura-se a sua redução, dado que representa uma perda de energia, mas em outros casos o objectivo é obter o seu valor elevado. A magnitude ou "nível" de atrito é frequentemente expressa em termos de coeficiente de atrito,  $\mu$ , que é a força de atrito ( $F_a$ ) dividida pela força ou carga normal ( $W$ ), pressionando os dois corpos sólidos juntos [20]:

$$\mu = \frac{F_a}{W} \quad 2.5$$

Expressar o atrito em termos de um "coeficiente" é uma prática enganosa, pois poderá induzir que este é uma propriedade intrínseca dos materiais, e que a força de atrito é sempre proporcional à carga aplicada, o que nem sempre é verdade. Note-se que  $\mu$  é uma constante apenas para um determinado par de materiais e para um determinado conjunto de condições de contacto. O fenómeno de atrito está intimamente ligado ao modo de interacção das superfícies em contacto e depende da sua natureza, da sua rugosidade e da presença ou ausência de películas contaminantes nas interfaces [20].

O atrito e o desgaste são causados por cenários complicados que envolvem múltiplas interacções microscópicas entre as superfícies que estão em contacto mecânico e que deslizam umas contra as outras. Essas interacções são o resultado dos materiais, das características geométricas e topográficas das superfícies e das condições gerais em que as superfícies deslizam umas contra as outras, como por exemplo, a carga, a temperatura, a atmosfera, o tipo de contacto, etc. Todos os aspectos mecânicos, físicos, químicos e aspectos geométricos do contacto da superfície e da atmosfera circundante afectam as interacções de superfície e, assim, também as características tribológicas do sistema. Portanto, o atrito e o desgaste não são apenas parâmetros dos materiais disponíveis nos manuais, eles são características únicas do sistema tribológico em que são medidos. Geralmente não há uma correlação simples entre o desgaste e o atrito, por exemplo, baixo atrito não implica baixas taxas de desgaste [20].

## 2.6. Degradação de materiais

Tal como referido anteriormente, os sistemas de transporte pneumático apresentam um duplo problema: o desgaste erosivo das condutas e a degradação do material transportado. Em seguida vai ser abordado a degradação do material transportado, pois este é o problema apresentado pela LCB, durante o transporte dos frascos para iogurte.

A degradação do material transportado pneumaticamente está associada geralmente à formação de fragmentos indesejáveis no material transportado, o que pode afectar negativamente o seu valor [9]. O fenómeno de degradação não é restrito a um determinado tipo de processo, ainda que existam alguns processos onde ele ocorra mais rapidamente ou onde os seus efeitos são mais graves [14]. A degradação de materiais, quando transportados através de sistema pneumático, é uma preocupação para a indústria de diversos sectores [9, 21-22], podendo ser um enorme problema para o controle de qualidade na manipulação de partículas sólidas e de transformação [23]. Este problema pode levar também a dificuldades relacionadas com a criação de poeiras, alterações das características do material e redução da qualidade do produto [21, 24] . Os sistemas de transporte pneumático são projectados para obter a máxima eficiência de transporte com o consumo mínimo de energia. Na maioria dos casos, o atrito não é considerado porque o seu efeito sobre o transporte é secundário, porém o seu efeito sobre o produto não o é [25].

A definição específica de degradação varia com a aplicação e com o tipo de produto que está a ser transportado. No caso do material transportado ser *pellets* poliméricas, a degradação muitas vezes manifesta-se sob a forma de poeiras e/ou ráfias (ou cabelo de anjo) [9].

### 2.6.1. Causas da degradação dos materiais

A degradação, devida ao transporte pneumático, ocorre principalmente como resultado do impacto ou tensão de corte [26]. Os parâmetros mais importantes que afectam a degradação de partículas são as velocidades do ar e das partículas, taxa de carga das partículas, as características do sistema de transporte (secções rectas e curvas) e as propriedades das partículas [26-27]. Mais especificamente, no caso de degradação devido ao impacto, a velocidade de colisão, o ângulo de colisão e a elasticidade da

colisão influenciam significativamente a deterioração das partículas [26-28]. Os parâmetros que afectam a degradação podem ser divididos praticamente em duas categorias: factores relacionados com o material e factores relacionados com o processo [9, 27-28]:

*1) Factores relacionados com o material transportado (partículas):*

- a. Composição;
- b. Forma e tamanho;
- c. Elasticidade.

*2) Factores relacionados com o processo:*

- a. Velocidade do ar de transporte e/ou velocidade das partículas;
- b. Concentração de partículas – taxa de carregamento;
- c. Material de construção das condutas (secções rectas e curvas);
- d. Acabamento superficial das condutas e curvas;
- e. Geometria das curvas;
- f. Número de curvas.

Alguns estudos mostram que materiais diferentes reagem de modo distinto a mudanças nas características das curvas e nas condições operacionais [27, 29]. Os parâmetros relacionados com o processo são mais fáceis de alterar para reduzir a degradação do que os parâmetros indicados no ponto 1) [27-28].

O transporte de materiais efectuado com velocidades baixas, é geralmente um processo livre de desgaste do material, sendo por isso preferível, em termos de prevenção de degradação, ao transporte com velocidades elevadas [28]. No entanto, nem todos os tipos de materiais são adequados ao transporte com baixas velocidades [27-28, 30]. Vários estudos demonstraram que a redução da velocidade de transporte pode reduzir consideravelmente a degradação de partículas [14, 26-27, 31].

As características das curvas são factores que também devem ser tidos em conta para reduzir a quantidade de degradação, uma vez que esta quantidade depende do ângulo de colisão com a parede (o ângulo entre a trajectória da partícula e a tangente à parede no ponto de colisão). Se o ângulo de impacto puder ser mantido baixo então é possível minimizar a degradação [13, 30, 32]. O ângulo de colisão pode ser reduzido, por exemplo, através do aumento da curvatura das curvas de raio longo [27-28, 30]. O ângulo de colisão torna-se máximo em 90°, quando a partícula colide com a parede na

perpendicular [28]. Foi mostrado também que, com a diminuição da rigidez das paredes das curvas, a quantidade de degradação diminui [27-29]. As curvas ao serem construídas com materiais mais macios (menor rigidez) poderão absorver uma porção da energia de colisão, diminuindo deste modo o atrito [27]. Em casos extremos, uma curva de raio longo (baixo ângulo de impacto) pode ser construída a partir de um material menos rígido (borracha) e neste caso o atrito vai ser menor, comparando com a mesma curva em aço [27, 29]. Outro material que também pode ser utilizado na construção das curvas, com o intuito de diminuir a degradação do material transportado, é o poliuretano pois, tal como a borracha, é um material com elevada resiliência [13]. A estrutura da curva afecta também a queda de pressão (consumo de energia), o desgaste fora da curva e a acumulação de material transportado nas paredes da curva. As condutas de transporte pneumático devem ser mantidas tão simples quanto possível para reduzir o número de curvas, reduzindo assim as mudanças de direcção durante o transporte e portanto a quantidade de material degradado [27, 33].

As curvas são instaladas num sistema de transporte pneumático sempre que é necessária uma mudança de direcção ao longo do trajecto de transporte. Actualmente existem muitos tipos de curvas no mercado. Historicamente, as curvas de raio longo (Figura 2.5), onde a razão entre o raio de curvatura e o diâmetro da conduta se encontra entre 8 e 14 ( $R_B/d$ ), foram a escolha para os projectistas de sistemas de transporte pneumático. Estas curvas proporcionam uma mudança de direcção mais gradual para as partículas e, portanto, são mais semelhantes à secção recta da conduta. Além disso, o ângulo de impacto sobre a parede da conduta é relativamente pequeno, o que ajuda a minimizar o risco de desgaste erosivo das condutas. No entanto, este tipo de curvas apresenta algumas desvantagens tais como o contacto prolongado das partículas com as paredes da conduta, o que pode resultar na degradação do material transportado (como ráfias no caso de *pellets* de polímeros) [9]. O desempenho dos diferentes tipos de curvas existentes é dependente do material por elas transportado [21].

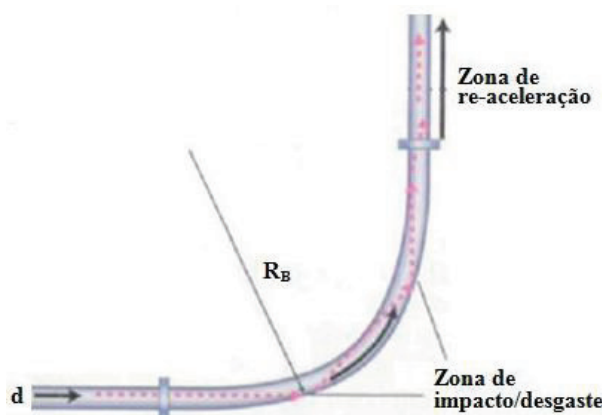


Figura 2.5 – Fluxo típico numa curva de raio longo, adaptado de [9].

### 2.6.2. Problemas associados à degradação dos materiais

Tal como já foi referido, o movimento de materiais poliméricos (*pellets* ou outros) através de sistemas de transporte pneumático pode levar à formação de impurezas, sob determinadas condições [11]. Essas impurezas podem apresentar-se sob a forma de cabelo de anjo (*angel hair*) ou apenas na forma de poeiras, e o seu aparecimento indica problemas no transporte dos materiais [1]. Tal como referido anteriormente, o termo “cabelo de anjo” pode também ter outras designações tais como “ráfia”, “fitas” ou “pele de cobra” [13] (Figura 2.6 (b) e (c)). Ao longo desta Dissertação apenas será referido o termo ráfia por ser o que mais se assemelha ao aspecto físico do produto de degradação.

Dependendo das causas de formação e do tipo de materiais transportados, as impurezas formadas vão ter diferentes características. A formação de poeiras, referidas na literatura como *dust* ou *finer* (Figura 2.6 (a)), resultam da ruptura de aglomerados de poliolefinas, quando estas entram em contacto com as condutas, no caso em que as superfícies internas são rugosas e a velocidade é elevada [1].

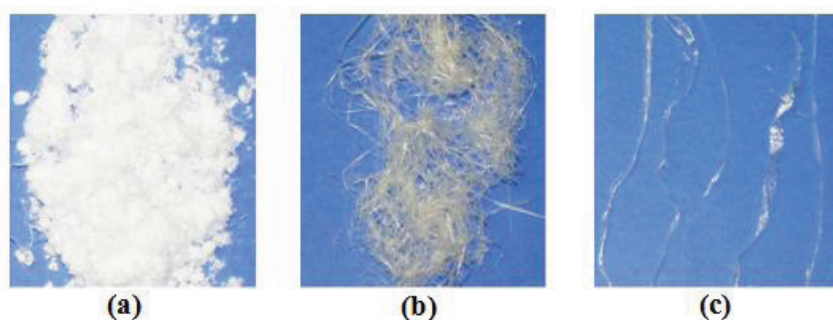


Figura 2.6 – Tipos de impurezas: (a) poeiras; (b) cabelos de anjo e (c) ráfias, [34].

O início da formação de ráfias é o resultado da combinação de diversas condições. A velocidade de partícula é a mais importante, mas a temperatura tanto da conduta como da *pellet* também são relevantes, tal como a taxa de partículas transportadas [11]. O aparecimento de ráfias é causado pelo contacto repetido das *pellets* contra as paredes da conduta de transporte. Cada *pellet* deposita uma parte muito pequena do polímero na parede, que posteriormente se funde com outras porções pequenas formando ráfias muito longas. A maioria das ráfias é formada nas curvas devido às elevadas forças centrífugas e na porção recta da conduta depois das curvas. Se os materiais plásticos são transportados com velocidade superior à que seria necessário, estes podem deslizar contra as paredes das condutas e aquecer por atrito, que por sua vez fará com que eles comecem a fundir, produzindo então as ráfias [35].

A formação de ráfias pode ser reduzida consideravelmente pelo tratamento apropriado da superfície das paredes das condutas. Para prevenir que o material deslize é necessária uma superfície rugosa, ou tornada rugosa. Contudo, se a superfície for demasiado rugosa pequenos fragmentos serão “arrancados” do material resultando numa grande percentagem de poeiras. A rugosidade em excesso das condutas também produzirá um efeito adverso na queda de pressão, e portanto na capacidade de transporte do material [11]. Para alguns materiais transportados, como o polietileno, é necessário um acabamento especial com a finalidade específica de reduzir o problema da formação de ráfias ou de fusão de partículas. Neste caso, poderá ser necessário utilizar uma superfície cuja rugosidade é criada artificialmente [13]. Para garantir que a degradação do material seja mínima devem ter-se em conta as variáveis apresentadas anteriormente.

A quantidade de ráfia gerada depende do tipo de plástico. Normalmente os plásticos menos rígidos têm taxas de produção de ráfia mais elevadas. A formação de ráfias foi observada em todos os tipos de polietileno, polipropileno e etc. [36].

## 2.7. Estratégias de minimização da degradação dos materiais

Nas empresas, as decisões devem ser tomadas com base na análise de factos e dados, recorrendo a técnicas e/ou ferramentas. O objectivo principal é identificar os maiores problemas de um processo, produto ou serviço e respectivas causas e, através da sua análise, encontrar a melhor solução [37]. As ferramentas da qualidade têm

finalidades distintas, pelo que em cada fase da resolução de um problema podem ser aplicadas várias ferramentas [38].

Existem sete ferramentas básicas da qualidade, que são técnicas utilizadas com a finalidade de definir, medir, analisar e propor soluções para os problemas que interferem no bom desempenho dos processos de trabalho, sendo por isso utilizadas para a melhoria contínua de um processo. A utilização destas ferramentas tem-se revelado extremamente eficaz na resolução de problemas. As sete ferramentas são:

- Fluxograma
- Diagrama de causa-efeito (diagrama de Ishikawa)
- Diagrama de Pareto
- Histograma
- Folha de Verificação
- Gráfico de Dispersão
- Carta de Controlo

A medição, a avaliação e a diminuição da variabilidade de produtos e processos são inseparáveis da melhoria contínua e é neste contexto que as técnicas estatísticas da qualidade assumem especial relevância. Na fase de planeamento, controlo e melhoria contínua da qualidade, de entre as várias técnicas estatísticas aplicáveis, salienta-se o Desenho de Experiências (Design of Experiments – DOE) que tem desempenhado um papel importantíssimo na redução sistemática da variação. Esta técnica permite determinar quais são os factores controláveis que afectam determinadas características da qualidade e quais os melhores níveis desses factores de forma a aumentar a resistência do produto aos factores não controláveis, satisfazendo, portanto, os requisitos das diversas partes interessadas no desempenho de uma organização [38].

### *2.7.1. Ferramentas básicas da qualidade*

#### **a) Fluxograma**

O fluxograma é um tipo de diagrama que pode ser entendido como uma representação esquemática de um processo, muitas vezes feita através de gráficos que ilustram de forma ordenada as diversas etapas, entradas e saídas que, de forma sequencial, vão contribuindo para a obtenção de um determinado produto [38-39]. O

fluxograma deve ser elaborado e periodicamente actualizado através de trabalho de equipa de forma a suscitar uma reflexão em conjunto das várias áreas funcionais.

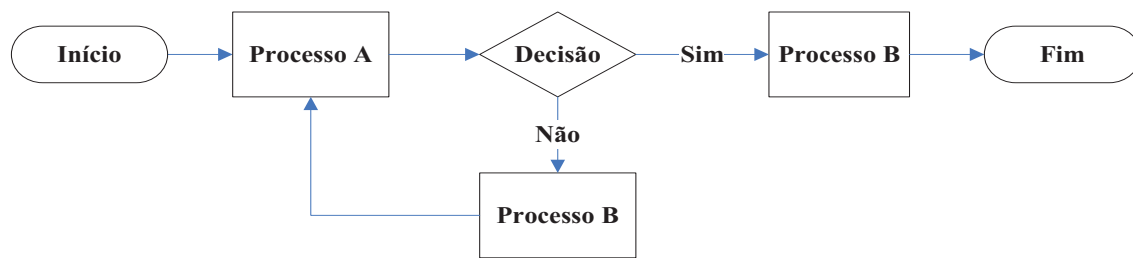


Figura 2.7 – Representação simplificada de um fluxograma, adaptado de [38].

### b) Diagrama de causa-efeito

O diagrama de causa-efeito foi desenvolvido por Kaoru Ishikawa em 1953, na Universidade de Tóquio, para representar a relação entre alguns efeitos que poderiam ser medidos e o conjunto de possíveis causas que produzem o efeito [40]. Por esta razão este diagrama por vezes é designado por diagrama de Ishikawa. Este diagrama é uma representação gráfica que permite visualizar facilmente a cadeia de causas e efeitos do problema e o seu objectivo principal é o de fornecer um modo de avaliar de forma sistemática todos os factores que podem afectar determinado problema [37]. As causas gerais (representadas pelas setas oblíquas que convergem para o eixo horizontal do diagrama) são variáveis ou factores que têm influência directa no problema em estudo (efeito). Estas podem ser, entre outras, mão-de-obra, equipamentos, métodos, materiais, meio ambiente, medições, tal como ilustrada a Figura 2.8. As causas primárias afectam directamente a respectiva causa geral e as causas secundárias afectam directamente as referentes causas primárias. Todo o diagrama é construído desta forma, utilizando a técnica de *Brainstorming*. O *Brainstorming* é um método utilizado para gerar um grande número de ideias rapidamente, em trabalho de equipa, e pode ser usado numa grande variedade de situações [37, 39].



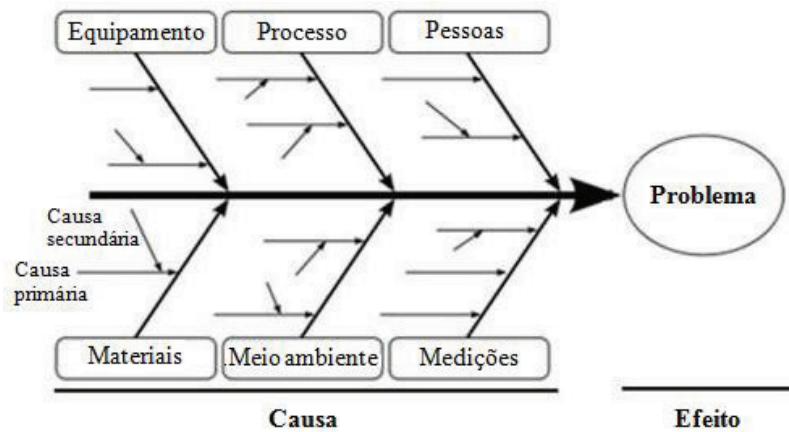


Figura 2.8 – Diagrama de causa-efeito, adaptado de [38].

O diagrama de causa-efeito, embora apresente extrema utilidade, apenas permite uma selecção qualitativa das causas que podem provocar um determinado efeito ou problema. Para determinar de forma quantitativa se tais causas estão a ter um efeito verdadeiramente significativo, no sentido estatístico do termo, deve complementar-se a análise recorrendo a outro tipo de técnicas como o Desenho de Experiências (DOE) [38].

### c) Diagrama de Pareto

O princípio de Pareto está na base do diagrama com o mesmo nome, e foi inicialmente desenvolvido pelo economista Vilfredo Pareto (1848-1923). Joseph Juran adaptou o princípio de Pareto à gestão da qualidade, considerando que a maioria dos efeitos está relacionada com um número reduzido de causas. Assim, pode-se portanto dizer que 80% dos problemas são causados por 20% das causas passíveis de os provocar [37-38, 40].

O diagrama de Pareto é um gráfico de barras que ordena as frequências das ocorrências, da maior para a menor, possibilitando estabelecer as prioridades dos problemas, indicando também a curva de percentagens acumuladas (Figura 2.9). A sua maior utilidade é a de permitir uma fácil visualização e reconhecimento das causas ou problemas mais relevantes, possibilitando a concentração de esforços sobre os mesmos. Uma vez identificadas as causas dever-se-á proceder à sua análise, estudo e implementação de processos que conduzam à sua redução ou eliminação. É uma das ferramentas mais eficientes para identificar problemas, melhorar a visualização, confirmar os resultados, comparar o antes e o depois do problema e identificar itens que são responsáveis pelos impactos eliminando as causas [37, 41].

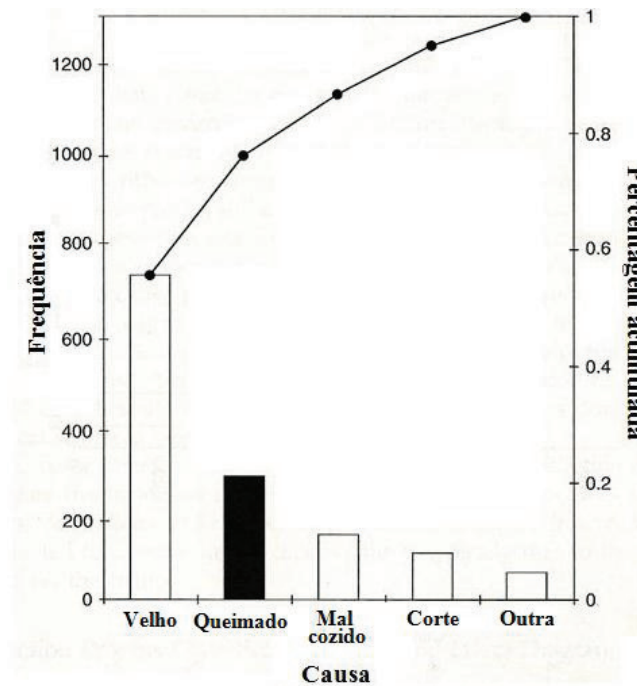


Figura 2.9 – Diagrama de Pareto, adaptado de [37].

#### d) Histograma

O histograma é um tipo de gráfico de barras (Figura 2.10) que ilustra a frequência do número de ocorrências dos valores obtidos. Este gráfico permite obter uma impressão visual objectiva sobre a dispersão e localização dos valores recolhidos e, caso a amostra seja representativa, da totalidade da população. A partir dele é possível verificar três propriedades da informação contida na amostra: a forma da distribuição dos dados, a tendência central dos dados e a dispersão ou variação dos mesmos. A simplicidade na sua construção e interpretação faz com ele seja uma ferramenta eficaz na análise de dados [37-38, 40].

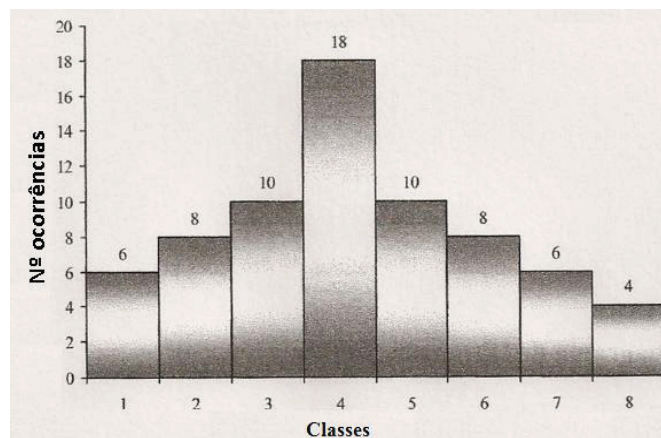


Figura 2.10 – Histograma, adaptado de [38].

### e) Formulário de recolha de dados

O formulário de recolha de dados ou folha de verificação permite responder às questões “quantas vezes sucede?” e “quando sucede?”. É importante que o formulário seja simples e desenhado em concordância com as características que se pretendem medir. Esta é uma ferramenta que permite compilar fácil e rapidamente a informação considerada relevante num determinado contexto. A sua utilização permite caracterizar a ocorrência de um determinado acontecimento e ajuda a formular uma solução baseada em factos objectivos e não em opiniões meramente subjectivas. A Figura 2.11 apresenta um exemplo de um formulário de recolha de dados, para o caso de defeitos detectados num produto [37-38].

Produto: _____	Data: _____	Encomenda: _____
Modelo: _____	Lote nº _____	Inspector: _____

Tipo de defeito	Registo de ocorrência	Frequência
Soldadura com fissuras		6
Acabamento deficiente		10
Soldadura com poros		25
Alinhamento incorrecto		7
Outros		5
Total de defeitos		53
Unidades rejeitadas		35
Total de unidades inspeccionadas		1 000

Figura 2.11 – Formulário de recolha de dados, [38].

### f) Gráficos de Dispersão

Um gráfico de dispersão constitui a melhor maneira de visualizar a relação entre duas variáveis quantitativas. O processo consiste na recolha de dados aos pares de duas variáveis para verificar a existência real da relação entre essas variáveis ao longo do tempo (medida dada pelo coeficiente de correlação), contrariamente a outras ferramentas que apenas se aplicam a dados individuais [40]. A Figura 2.12 representa os diagramas de dispersão correspondentes a três situações distintas: casos em que existe uma forte correlação entre as variáveis X e Y (a e b) e caso em que não existe correlação entre essas variáveis (c) [38].

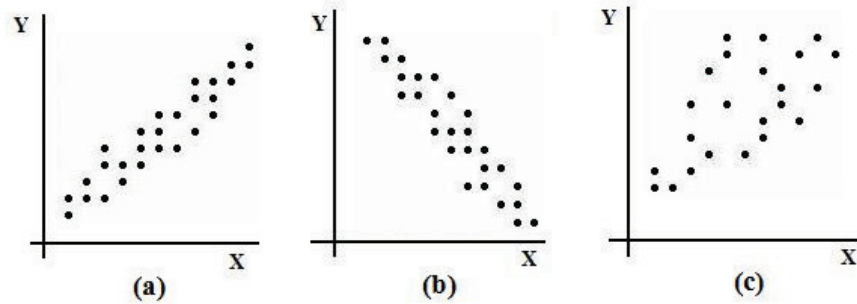


Figura 2.12 – Gráfico dispersão: (a) com correlação positiva; (b) com correlação negativa e (c) sem correlação, adaptado de [38].

É importante referir que a correlação entre duas variáveis não implica necessariamente uma relação de causa-efeito. A verificação de causalidade deve ser efectuada recorrendo a outras técnicas, tais como o DOE.

#### g) Carta de Controlo

A carta de controlo é um gráfico com linhas limites para mostrar o intervalo aceitável da qualidade. O principal objectivo é a detecção rápida de ocorrências anormais nos processos de produção. São usadas para ilustrar ao longo do tempo os resultados observados e determinar, se um processo está próximo à média ou entre os limites de controlo superior e inferior. As cartas de controlo permitem monitorizar os processos e desta forma indicar pontos de melhoria. Existem muitos tipos de cartas de controlo, dependendo da característica a tratar estatisticamente. [37, 39].

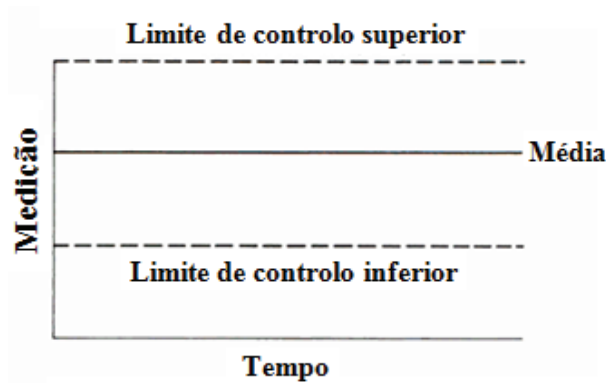


Figura 2.13 – Modelo esquemático de uma carta de controlo, adaptado de [39].

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. Recolha de ráfia

Para fazer a recolha de ráfia utilizou-se um saco de plástico que foi colocado junto ao desacelerador em  o inox, antes da curva de 90  em PVC à entrada do silo de armazenamento dos frascos, tal como ilustrada a Figura 3.1. Seguidamente, a ráfia recolhida foi pesada utilizando uma balança analítica.



Figura 3.1 – Recipiente de recolha da ráfia.

##### 3.1.1. *Recolha de ráfia referente ao caudal de ar de transporte dos frascos, em condições standard ( $V_1$ )*

1. Efectuar limpeza da conduta seleccionada;
2. Recolher, para recipiente adequado, uma quantidade mensurável de ráfia. Definir o intervalo até efectuar esta recolha (número de frascos transportados);
3. Pesar a quantidade recolhida;
4. Voltar ao ponto 1 e repetir esta acção duas vezes.

##### 3.1.2. *Recolha de ráfia após redução do caudal de ar de transporte dos frascos ( $V_2$ )*

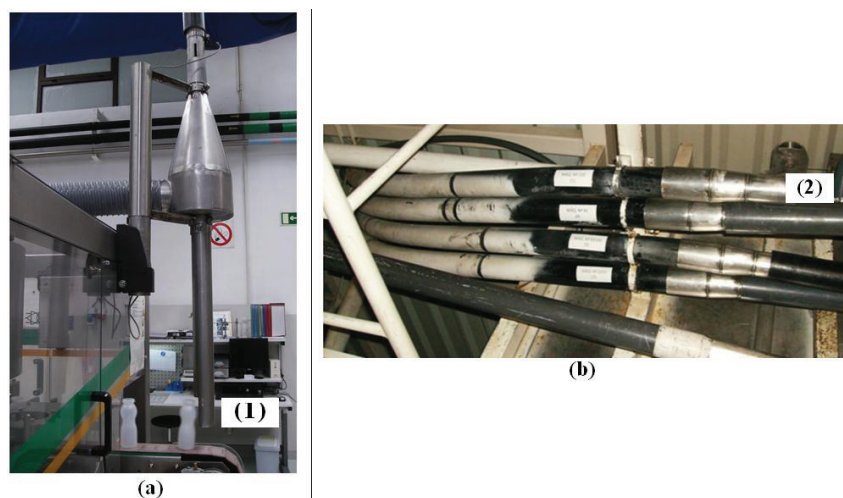
1. Reduzir o caudal de ar de transporte dos frascos para o mínimo possível ( $V_2$ ), na conduta seleccionada anteriormente.
2. Efectuar limpeza da conduta;

3. Recolher, para recipiente adequado, uma quantidade mensurável de rafia.  
O número de frascos transportados na conduta, até efectuar a recolha de ráfias, deve ser igual ao definido no ponto 2 do teste anterior;
4. Pesar a quantidade recolhida;
5. Voltar ao ponto 2 e repetir esta acção duas vezes.

Das acções referidas no teste anterior ( $V_2$ ) apenas foram realizados os pontos 1 a 3 pois, após a redução do caudal de ar de transporte dos frascos, deixou de existir rafia no recipiente de recolha.

### 3.2. Recolha de dados para determinação da velocidade de transporte dos frascos

Tendo em conta as diferenças apresentadas pelas fábricas de Castelo Branco e Oliveira de Azeméis, foi proposto determinar-se a velocidade dos frascos nas condutas, nas duas fábricas. Assim, procedeu-se à medição do tempo que os frascos demoram a percorrer dois pontos conhecidos da conduta (Figura 3.2). Para tal, utilizaram-se dois cronómetros e um frasco para iogurte. O frasco utilizado para a medição dos tempos era colorido, para ser possível distingui-lo dos restantes frascos transportados, uma vez que os ensaios foram realizados com a conduta em normal funcionamento.



**Figura 3.2 – Pontos de cronometragem dos tempos: (a) ponto (1) e (b) ponto (2).**

### 3.2.1. *Recolha de dados na LCB*

Para medição dos tempos, o frasco utilizado foi da geometria *Bio* sem cabeça perdida. Pontos de recolha de tempos:

Ponto 1) Entrada do frasco na conduta, antes do Ventury;

Ponto 2) Saída do frasco, após a segunda curva longa em PE.

### 3.2.2. *Recolha de dados na LOA*

Para medição dos tempos, utilizou-se o frasco referente ao modelo *Adágio*. Pontos de recolha de tempos:

Ponto 1) Entrada do frasco na conduta, antes do Ventury.

Ponto 2) Saída do frasco após a curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento.

Em ambas as fábricas, cada medição foi realizada três vezes.

## 3.3. Estudo do efeito da temperatura dos frascos

Para a medição da temperatura dos frascos utilizou-se um medidor de temperatura de infra-vermelho.

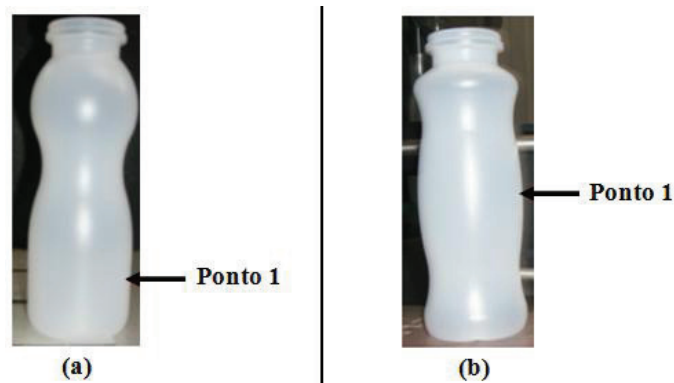
### 3.3.1. *Medição da temperatura na LCB*

Na fábrica de Castelo Branco, uma vez que os frascos após a saída da máquina de extrusão-sopro passam pelo sistema de corte das cabeças perdidas, mediu-se a temperatura em dois locais: à saída da máquina e à entrada da conduta. Devido ao facto dos frascos estarem em constante movimento não foi possível utilizar o mesmo frasco para a medição da temperatura nos dois locais referidos anteriormente.

Através da medição da temperatura dos frascos, em diversos pontos do mesmo, foi possível observar que esta varia de ponto para ponto, quer horizontalmente quer verticalmente. Assim, e para tentar minimizar o erro de determinação, fixou-se um ponto na vertical (*ponto 1* – Figura 3.3). No entanto, na horizontal, apesar desse esforço,



não foi possível garantir que o ponto de medição fosse o mesmo em todas as medições, visto que não existia nenhum ponto que se pudesse considerar como referência. Este ponto de medição dependia da posição com que o frasco saía da máquina.



**Figura 3.3 – Ponto de determinação da temperatura dos frascos: (a) geometria *Frusion* e (b) geometria *Bio*.**

### 3.3.2. *Medição da temperatura na LOA*

Na fábrica de Oliveira de Azeméis, os frascos após a saída da máquina de extrusão-sopro seguem directamente para a conduta de transporte. Por este motivo a temperatura dos frascos apenas foi medida à saída da máquina.

Através da medição da temperatura em diversos pontos do frasco foi possível observar que esta varia de ponto para ponto, quer horizontalmente quer verticalmente. Assim, tal como no caso anterior, fixou-se um ponto na vertical (*ponto 1* – Figura 3.4), e na horizontal não foi possível considerar nenhum ponto como referência.



**Figura 3.4 – Ponto de determinação da temperatura dos frascos.**



### 3.4. Estudo do efeito do atrito

A medição dos coeficientes de atrito, entre a superfície externa dos frascos e a superfície interna das condutas de diversos materiais, foi realizada num tribómetro *PLINT-TE67*, no Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho, sob coordenação do professor José Gomes.

#### 3.4.1. Características dos provetes

O provete é constituído por um disco e uma placa. O disco (diâmetro  $\approx 6$  mm), extraído da parede polimérica dos frascos, foi colado a um suporte cilíndrico em aço, designado por pino, Figura 3.5 (a)), o qual permitiu a montagem no tribómetro. A face destinada ao contacto tribológico foi a face correspondente à superfície exterior do frasco. A placa (forma rectangular com 30 mm x 15 mm e espessura igual à da parede da conduta) foi extraída do interior da conduta, na qual é feito o transporte dos frascos (Figura 3.5 (b)). A face utilizada para o contacto tribológico foi a face correspondente ao interior da conduta.



Figura 3.5 – Proveste: (a) pino com disco e (b) base com placa.

Tabela 3.1 – Materiais utilizados nos testes tribológicos.

Disco		Placa
Logoplaste Castelo Branco (Danone)	Logoplaste Oliveira de Azeméis (Adágio)	PVC novo
		PVC usado
		HDPE
		Inox

### 3.4.2. Caracterização dos ensaios

Os testes foram realizados na geometria placa-pino, tal como referido anteriormente, com movimento linear alternativo da placa. Como parâmetros de teste, a carga normal foi fixada em 5 N, o movimento linear alternativo da placa caracterizou-se por uma frequência de 1 Hz e um curso de 20 mm. Em cada teste o deslizamento ocorreu durante 5 minutos, para cada par de materiais em contacto. Para que os resultados fossem estatisticamente significativos foram realizados pelo menos 3 testes, para cada par de materiais. Antes de iniciar qualquer teste procedeu-se à limpeza do disco e da placa, com álcool e algodão.

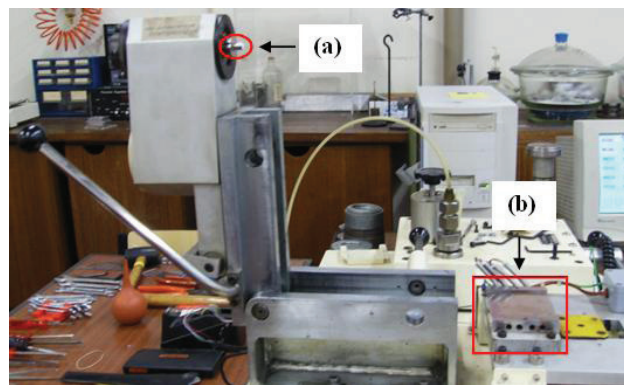


Figura 3.6 – Tribómetro: (a) pino e (b) zona onde foi colocada a base.

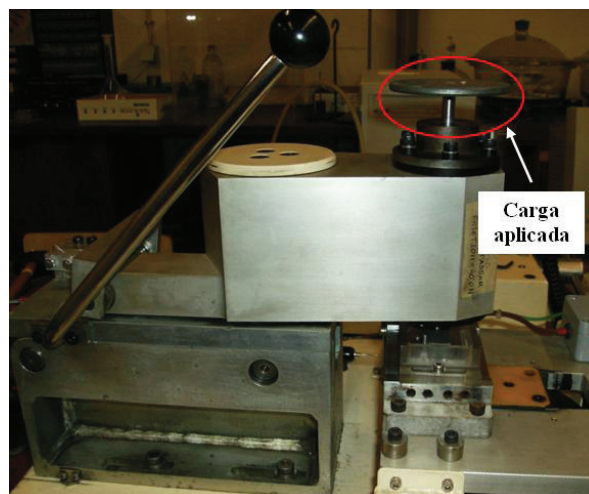


Figura 3.7 – Tribómetro em funcionamento.

O tribómetro encontra-se acoplado a um computador com *software* próprio para introdução dos parâmetros de ensaio e seu controlo, aquisição de dados e cálculo das grandezas resultantes.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Para propor soluções para o problema da formação de ráfias foi necessário analisar todos os factores que o poderiam influenciar. Primeiro, através do estudo da formação de ráfias, recorrendo a fontes bibliográficas, identificaram-se possíveis causas para este problema. Em paralelo fez-se a análise do problema na fábrica e identificou-se os pontos críticos da formação de ráfias (rectângulos azuis – Figura 4.1). Em seguida, e tendo em conta que a fábrica Logoplaste Oliveira de Azeméis não apresentava o problema da formação de ráfias durante o transporte dos frascos para iogurte, apesar das inúmeras semelhanças ao nível do processamento e transporte dos frascos, procedeu-se ao levantamento de determinadas variáveis nesta fábrica com o intuito de comparar com o que acontecia em Castelo Branco, como será discutido na secção 4.2.

Após este levantamento, procedeu-se a uma identificação de todos os factores que poderiam influenciar a formação de ráfias na fábrica de Castelo Branco e elaborou-se um diagrama de causa-efeito. Dos factores expostos neste diagrama foram seleccionados alguns a ser estudados, na fábrica e em laboratório. Foi também proposto quantificar alguns factores, que se consideraram mais importantes, nas fábricas de Oliveira de Azeméis e de Castelo Branco. Esta quantificação teve como objectivo analisar e perceber melhor o que se passava nas duas unidades industriais e assim ajudar na resolução do problema em estudo.

Por fim, explorou-se o desenvolvimento de um modelo que pudesse, futuramente, ser utilizado com vista a melhorias na fábrica, nomeadamente ao nível da queda de pressão ao longo das condutas de transporte dos frascos e também ao nível da velocidade de transporte dos mesmos.

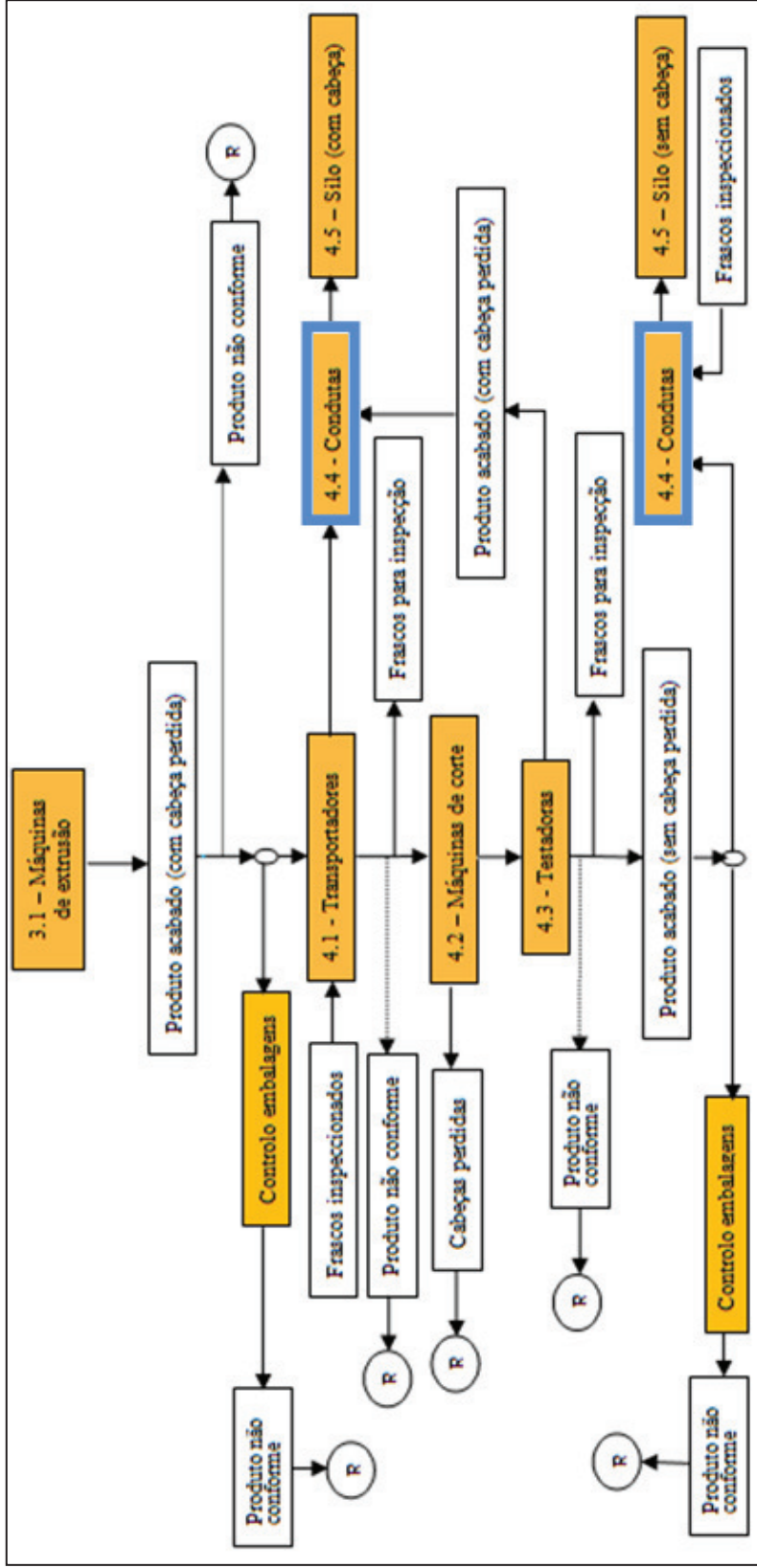


Figura 4.1 – Fluxograma do processo de transporte dos frascos.

#### 4.1. Análise do problema da formação de ráfias na LCB

Com o intuito de analisar o problema da formação de ráfias na LCB procedeu-se à identificação e compreensão do mesmo. Esta análise permitiu observar que a formação de ráfias ocorre em todas as condutas de transporte dos frascos, no entanto não ocorre de igual modo em todas. Os resultados desta análise preliminar do problema encontram-se na Tabela 4.1. Observou-se também que a formação de ráfias não era influenciada pela geometria dos frascos nem pela máquina de extrusão-sopro na qual estes eram fabricados. Pode-se igualmente concluir que a potência de ventilador usada no fornecimento do ar de transporte dos frascos influenciava a formação de ráfias, uma vez que o ventilador de maior potência (5,5 Cv) fornecia o ar com maior velocidade, o que consequentemente provocava maior velocidade aos frascos.

**Tabela 4.1 – Análise do problema da formação de ráfias na LCB.**

Máquina extrusão-sopro	Tipo de frasco	Potência do ventilador (Cv)	Velocidade de transporte dos frascos
63	Com cabeça perdida	3	Maior
64	Com cabeça perdida	3	
154	Sem cabeça perdida	5.5	
251	Com cabeça perdida	3	Menor
250	Sem cabeça perdida	3	
2053	Sem cabeça perdida	3	

No caso dos frascos fabricados nas máquinas 63, 64 e 154 foi possível observar que, qualitativamente, a velocidade de transporte é maior do que no caso dos frascos fabricados nas máquinas 251, 250 e 2053. O facto da velocidade de transporte dos frascos não ser igual em todas as condutas poderá ter diversas causas. No caso em que os frascos são enviados com cabeça perdida o ar do ventilador é usado apenas para o envio dos frascos. No entanto, no caso dos frascos enviados sem cabeça perdida o ar do ventilador, além de ser utilizado para enviar os frascos, é utilizado para enviar as cabeças perdidas para o moinho onde posteriormente estas irão ser trituradas. Assim, para o mesmo ventilador, o caudal de ar que é usado para o transporte dos frascos é superior no caso dos frascos com cabeça perdida. Este facto pode justificar a diferença de velocidade dos frascos provenientes das máquinas 63, 64, 250 e 2053, pois os ventiladores têm a mesma potência. No caso do transporte dos frascos da máquina 154,

a potência do ventilador é maior, o que faz com que a velocidade de transporte dos frascos nessas condutas também seja superior. Relativamente aos frascos provenientes da máquina 251, estes são transportados com uma velocidade inferior aos das máquinas 63 e 64 pois, como o percurso que esses têm de percorrer até à entrada no silo é maior, a queda de pressão irá ser mais elevada e assim a velocidade de transporte irá decrescer.

De modo qualitativo, nas condutas onde os frascos são enviados com maior velocidade a quantidade de ráfia formada é visivelmente superior. Esta ocorrência leva a presumir que, tal como é referido na literatura, a velocidade de transporte do material é um factor de extrema importância.

## 4.2. Estudo comparativo entre a LCB e a LOA

O levantamento de dados efectuado na LCB e a LOA visou estudar as condições de fabrico e transporte dos frascos nestas duas fábricas. As semelhanças, tanto ao nível de processamento como de transporte, são evidentes no entanto, na LOA não ocorre formação de ráfias durante o transporte dos frascos. Os dados recolhidos neste levantamento encontram-se compilados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados comparativos entre as fábricas Logoplaste Castelo Branco e Logoplaste Oliveira de Azeméis.

Variáveis	Logoplaste Castelo Branco	Logoplaste Oliveira de Azeméis
Matérias-primas	HDPE + aditivo à base $\text{CaCO}_3$ em PE	HDPE + corante – “Masterbatch”
Temperatura do processo extrusão-sopro ( $^{\circ}\text{C}$ )	180 – 190	175 – 180
Características dos ventiladores utilizados no sistema aspiração-sopro	Quatro ventiladores AP 602: 3 Cv e $6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	Três Ventiladores AP 804: 7,5 Cv e $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
	Um ventilador AP 604: 5.5 Cv e $10 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$	Três Ventiladores AP 608: 15 Cv e $50 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Cadência máxima de envio de frascos por conduta por hora	7000	3150
Material de construção das condutas (troços rectos)	PVC	PVC
Diâmetro interno das condutas (mm)	75	75
Distância máxima de transporte dos frascos (m)	$\pm 50$	$\pm 80$
Inclinação das condutas e comprimento de inclinação	$30^{\circ}$ (25 – 30 m)	$45^{\circ}$ ( $\approx 10$ m)
Ângulo e material das curvas	Duas curvas de $90^{\circ}$ em PVC	Duas/três curvas de $90^{\circ}$ em PVC
	Uma curva de $45^{\circ}$ em PVC	Uma curva longa de $90^{\circ}$ em PVC
	Duas curvas longas em PE	Uma curva longa de $45^{\circ}$ em PE
Método de limpeza das condutas	Escovilhão abrasivo	Pano embebido em álcool
Periodicidade entre cada limpeza (meses)	6	2
Interior das condutas (secções rectas e curvas) <sup>3</sup>	O interior das curvas de $90^{\circ}$ apresenta ráfias	O interior das curvas de $90^{\circ}$ não apresenta ráfias
	O interior dos troços rectos apresenta algumas ráfias	O interior dos troços rectos não apresenta ráfias

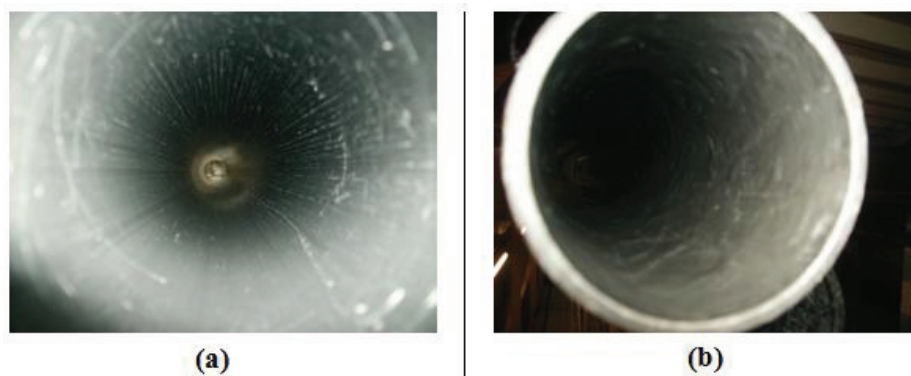
Através deste levantamento foi possível identificar diferenças importantes entre as duas fábricas, nomeadamente ao nível das matérias-primas utilizadas no fabrico dos frascos. Outra variável importante que diferencia as duas unidades tem a ver com o método e periodicidade de limpeza das condutas. O estado das condutas de transporte dos frascos, nestas duas fábricas, também é notório. Para uma maior percepção do estado das condutas apresenta-se em seguida fotografias das mesmas.

<sup>3</sup> O interior das condutas pode ser visível nas fotografias da secção 4.2.1



#### 4.2.1. *Fotografias do interior das condutas*

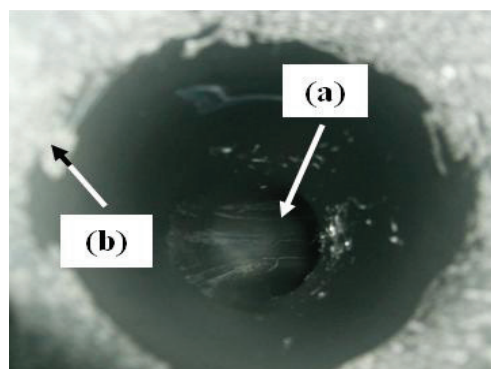
- **Fotografias do interior das condutas na LCB, antes da redução do caudal de ar de transporte dos frascos**



**Figura 4.2 – Troço recto em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos: (a) vista interior e (b) vista exterior.**



**Figura 4.3 – Curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos.**



**Figura 4.4 – Curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos.**



➤ **Fotografias do interior das condutas da LOA, em condições standard**

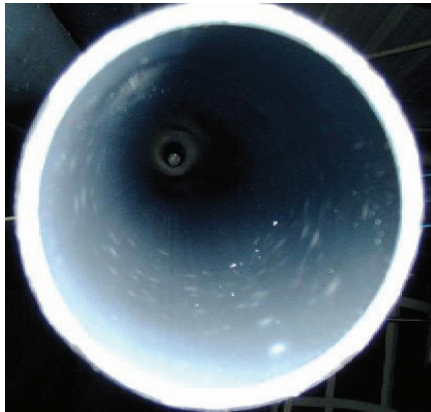


Figura 4.5 – Troço recto PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos.



Figura 4.6 – Curva de 90° em PCV, antes do silo de armazenamento dos frascos.

Através das figuras apresentadas anteriormente, pode observar-se que a maior diferença entre as condutas destas duas unidades industriais se verifica ao nível das curvas de 90° em PVC (ponto (a) – Figura 4.4), que antecedem os silos de armazenamento dos frascos. Os troços rectos em PVC não apresentam grandes diferenças no entanto, no caso dos troços da LCB estes apresentam alguns vestígios de ráfias no seu interior. De salientar que, a região mais clara da curva de 90° (ponto (b) – Figura 4.4) diz respeito a uma “anomalia” da curva e não uma acumulação de ráfias.

### 4.3. Causas prováveis para o problema da formação de ráfias

Com o objectivo de identificar todos os factores que podem influenciar a formação de ráfias na LCB, após a análise do problema na LCB e respectiva comparação com a fábrica LOA, foi constituída uma equipa multidisciplinar e, numa reunião, a mesma identificou os seguintes factores como possíveis causas para o problema da formação de ráfias:

- Tempo funcionamento da conduta;
- Velocidade de transporte dos frascos na conduta;
- Temperatura da conduta;
- Número de curvas, ao longo de cada conduta;
- Geometria das curvas utilizadas;
- Material de construção da conduta;
- Matérias-primas utilizadas no fabrico dos frascos;

- Temperatura dos frascos à entrada da conduta;
- Quantidade de frascos transportados, por conduta;
- Acabamento interior da conduta.

Em seguida, organizou-se as variáveis apresentadas anteriormente recorrendo ao diagrama de causa-efeito (Figura 4.7).

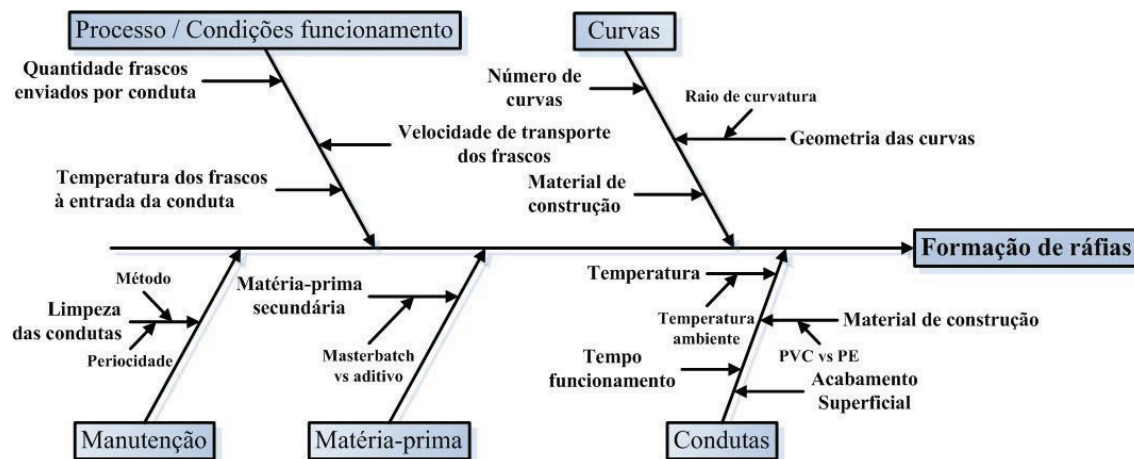


Figura 4.7 – Diagrama de causa-efeito referente ao problema da formação de ráfia.

A partir deste diagrama, e tendo como base, além da informação fornecida nas fontes bibliográficas o conhecimento industrial, foram seleccionadas as variáveis que poderiam ter maior influência no problema em estudo e que poderiam mais facilmente ser estudadas, quer na fábrica quer em laboratório:

- Velocidade de transporte dos frascos;
- Geometria e número de curvas;
- Matérias-primas utilizadas no fabrico dos frascos;
- Temperatura dos frascos à entrada da conduta.

Tendo em conta as variáveis seleccionadas anteriormente, foram identificados os testes a realizar:

- 1) Quantificação da ráfia formada em quatro situações distintas, em que as variáveis em estudo são a velocidade de transporte dos frascos e o tipo de curvas que são utilizadas;
- 2) Determinação da velocidade de transporte dos frascos, nas fábricas da LCB e da LOA;

- 3) Determinação de coeficientes de atrito, utilizando diferentes materiais das condutas da LCB e frascos da LCB e da LOA;
- 4) Medição da temperatura dos frascos à entrada das condutas, nas fábricas da LCB e da LOA.

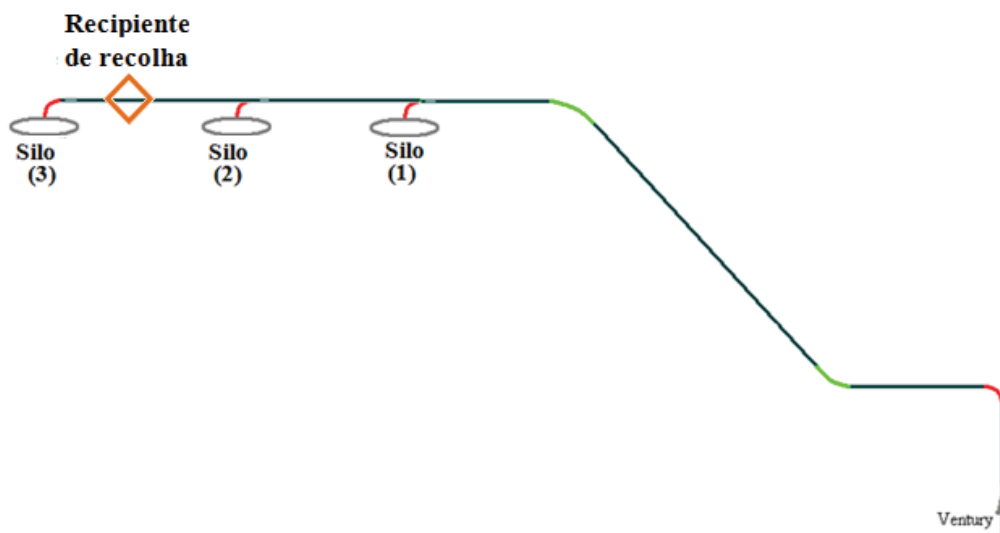
#### 4.4. Quantificação da ráfia formada

Com o objectivo de quantificar a formação de ráfias durante o transporte dos frascos, ao longo das condutas, efectuaram-se dois testes na fábrica LCB. Primeiro, pretendeu-se determinar a quantidade de ráfias formadas nas condições em que a fábrica operava (condições iniciais, nesta Dissertação designadas como condições standard –  $V_1$ ). Sabendo que nem todas as condutas transportavam os frascos com a mesma velocidade e que esta é factor extremamente crítico na formação de ráfias, reduziu-se o caudal de ar de transporte dos frascos para o mínimo possível ( $V_2$ ) e quantificou-se, nestas condições, a ráfia formada.

Uma vez que as condições de transporte dos frascos diferem de conduta para conduta foi fundamental realizar todos os testes na mesma conduta. A conduta que transportava os frascos provenientes das máquinas 63 e 64 foi a seleccionada para a execução das experiências. Estes frascos correspondiam à geometria *Frusion* com cabeça perdida. A selecção da conduta teve a ver com o facto de esta formar, qualitativamente, maior quantidade de ráfia, apesar de ser aquela que transportava menor quantidade de frascos por hora (5000) e também porque esta era uma das condutas em que os frascos eram transportados com maior velocidade, tal como foi referido anteriormente.

Antes da realização de qualquer teste foi decidido efectuar a limpeza da conduta seleccionada para que assim não houvesse influência das condições anteriores na quantidade de ráfia recolhida. Ao efectuar a primeira recolha de ráfia nas condições standard determinou-se o intervalo entre cada recolha seguinte, o qual correspondeu ao número de frascos transportados na conduta. No entanto, esse número não foi exactamente o mesmo nas três recolhas efectuadas, tal como mostra a Tabela 4.3. A quantidade de frascos transportados, registada nesta tabela, diz respeito à quantidade de frascos que passam pela zona onde se encontra o recipiente de recolha, ou seja a quantidade de frascos armazenados no silo (3) – Figura 4.8. No entanto, uma vez que cada conduta transporta frascos para mais do que um silo, os frascos provenientes das

máquinas 63 e 64, além de serem armazenados no silo (3), são armazenados em mais dois silos ((1) e (2) – Figura 4.8). O número total de frascos transportados por esta conduta, até ao ponto antes do silo (1), é 458255, 665539 e 369000, respectivamente recolha 1, recolha 2 e recolha 3. O cálculo do número de frascos enviados para os silos foi feito com base num sistema onde se tem o registo da máquina de extrusão-sopro que fabrica os frascos, a hora, o silo de armazenamento e a hora de início e de fim de enchimento do mesmo. A massa de rafia recolhida, nas condições standard, encontra-se na Tabela 4.3.



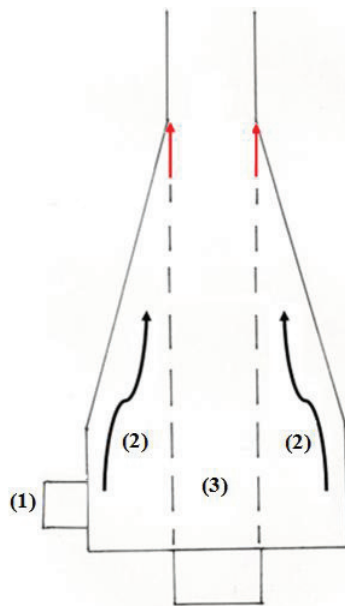
**Figura 4.8 – Esquema da conduta de transporte seleccionada para efectuar os testes.**

**Tabela 4.3 – Resultados obtidos referentes à formação de rafias nas condições standard ( $V_1$ ).**

	<b>Recolha 1</b>	<b>Recolha 2</b>	<b>Recolha 3</b>
<b>Data de recolha</b>	25-Jan	08-Fev	14-Fev
<b>Número de frascos armazenados no silo (3)</b>	166000	185000	179000
<b>Massa rafia recolhida <math>\pm 0,01</math> (g)</b>	0,64	0,32	0,21

Após a última recolha de rafia, a 14 de Fevereiro, referente às condições standard, procedeu-se à limpeza da conduta e em seguida à redução do caudal de ar de transporte dos frascos ( $V_2$ ). A redução do caudal de ar provoca redução da velocidade do mesmo e consequentemente redução da velocidade de transporte dos frascos. O ar proveniente do ventilador (Figura 4.9 (1)) entra no Ventury e dentro deste existe um tubo móvel (Figura 4.9 (3)) que transporta os frascos no seu interior até à conduta. O

que faz alterar o caudal de ar é o ponto onde se encontra este tubo. Quanto mais o tubo móvel estiver deslocado para cima menor é a área da secção no Ventury (setas a vermelho – Figura 4.9) e consequentemente menor será o caudal de ar de transporte dos frascos. Apesar do caudal de ar à saída do ventilador ser sempre o mesmo, o caudal de ar de transporte dos frascos não o é, uma vez que a diminuição da secção de passagem do ar origina maior transferência de caudal de ar para a conduta de envio das cabeças perdidas, e consequentemente menor para a conduta de envio dos frascos.



**Figura 4.9 – Esquema do Ventury: (1) entrada de ar proveniente do ventilador; (2) sentido da circulação de ar no Ventury e (3) tubo móvel em inox.**

A Figura 4.10 apresenta a evolução da formação da ráfia ao longo do período de recolha. O ponto  $V_1$  diz respeito às três recolhas de ráfias efectuadas nas condições standard. O ponto  $V_2$  corresponde à massa de ráfia após a redução do caudal de ar. Neste caso, observou-se inexistência de ráfias no recipiente de recolha, ou seja, a massa de ráfia no período seguinte à redução do caudal de ar de transporte dos frascos foi zero gramas. Este facto pode ser comprovado através da fotografia do recipiente de recolha (Figura 4.11) tirada no dia 7 de Abril, sendo que não houve nenhuma alteração das condições de transporte, desde a redução do caudal de ar.

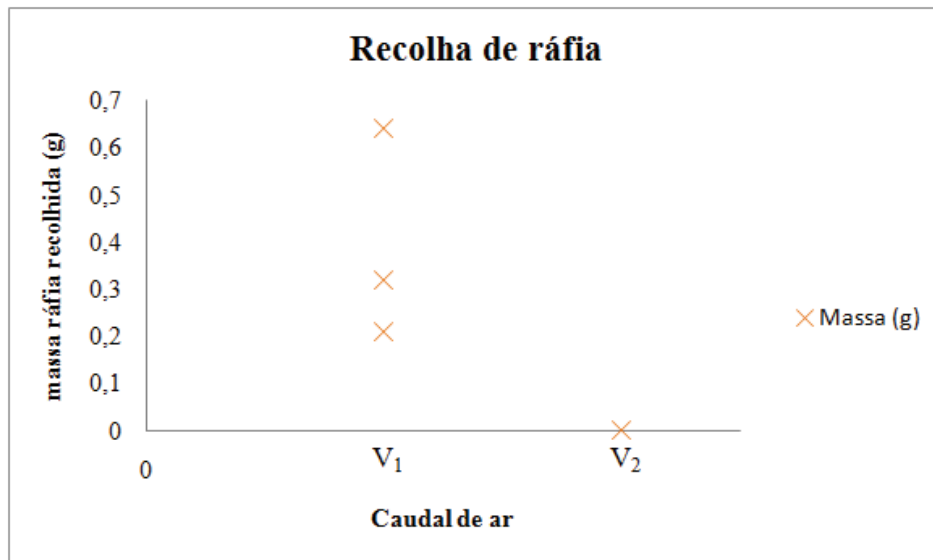


Figura 4.10 – Quantidade de rafia recolhida nos dois testes realizado.



Figura 4.11 – Recipiente de recolha de rafia.

Depois da redução do caudal de ar de transporte dos frascos, que tal como referido anteriormente provocou a quase total resolução do problema da formação de ráfias, em vez de ráfias passou-se a observar a formação de algumas poeiras, que se depositam no chão por baixo das condutas (Figura 4.12).



**Figura 4.12 – Poeiras formadas após a redução do caudal de ar de transporte dos frascos.**

Além da redução do caudal de ar de transporte dos frascos na conduta teste, efectuou-se também redução do mesmo nas restantes condutas e, tal como sucedeu na conduta teste, foi notória a escassez ou inexistência de ráfias. Os dados apresentados, referentes à recolha de rafia nas condições standard ( $V_I$ ), mostram que ao longo das três recolhas efectuadas a quantidade de rafia foi diminuindo. Este facto pode ter sido influenciado pelo modo ou periodicidade de limpeza da conduta, no entanto, devido ao número reduzido de dados, não é possível afirmar inequivocamente que a diminuição da quantidade de rafia recolhida seja devida à limpeza da conduta efectuada entre cada uma das três recolhas. Relativamente aos testes em que se proponha alterar as características das curvas, estes não foram realizados pois, tal como referido anteriormente, após a redução da velocidade de transporte dos frascos deixou de se observar ráfias nas condutas. Além deste motivo salienta-se o facto de a encomenda das curvas não ter chegado a tempo de se realizarem estes testes. No entanto, estas curvas irão ser testadas futuramente na fábrica.

Caso o número de dados experimentais recolhido tivesse sido maior, seria possível aplicar outras ferramentas da qualidade, expostas anteriormente. Por exemplo, recorrendo ao gráfico de dispersão, seria possível visualizar a relação entre a quantidade de rafia formada e outra variável quantitativa (velocidade de transporte dos frascos, material e raio de curvatura das curvas utilizadas) ao longo do tempo. Além desta ferramenta, também seria possível utilizar a carta de controlo. Neste caso, definindo os limites superior e inferior aceitáveis de qualidade, para formação de ráfias, efectuava-se recolha desta ao longo de determinado período de tempo. Com estes resultados construía-se uma carta de controlo e monitorizava-se deste modo a formação de ráfias.



Identicamente, caso se tivesse efectuado recolha de ráfias nas quatro situações propostas inicialmente, tal como se apresenta na Tabela 4.4, o tratamento dos resultados poderia ser feito recorrendo a um Desenho de Experiências (DOE).

**Tabela 4.4 – Factores controláveis e níveis, para efectuar recolha de ráfia.**

Factores	Níveis	
A – Velocidade	A1 – condições standard	A2 – redução para o mínimo possível
B – Curvas	B1 – condições standard	B2 – novas características

Neste caso, variando conjuntamente os níveis dos factores, observava-se as correspondentes alterações na variável resposta, ou seja, na quantidade de ráfia formada. Com esta análise era possível sugerir uma solução para o problema com base em mais do que um factor.

#### 4.5. Velocidade de transporte dos frascos

Através da medição do tempo que o frasco seleccionado demorou a percorrer a conduta entre os dois pontos seleccionados e sabendo o comprimento da conduta (39 m), entre esses dois pontos, foi possível determinar a velocidade média de transporte do frasco. Estas medições foram realizadas na LCB antes e depois da redução do caudal de ar de transporte dos frascos. Os valores obtidos encontram-se compilados nas tabelas 4.5 e 4.6, respectivamente.

No sentido de melhor compreender este efeito foram também realizadas medições na LOA em condições standard. Neste caso o comprimento da conduta utilizada nas medições efectuadas foi 80 m. Os resultados obtidos encontram-se compilados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.5 – Tempo e velocidade de transporte dos frascos na conduta, antes da redução do caudal de ar de transporte dos frascos na LCB.**

	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		
	Ponto (1)	Ponto (2)	Ponto (1)	Ponto (2)	Ponto (1)	Ponto (2)	
<b>t (s)</b>	4,13	7,12	1,21	4,27	2,56	5,65	<b>Média</b>
<b><math>\Delta t</math> (s)</b>	2,99		3,06		3,09		3,05
<b><math>v</math> (m.s<sup>-1</sup>)</b>	13,04		12,75		12,62		12,80



**Tabela 4.6 – Tempo e velocidade de transporte dos frascos na conduta, após a redução do caudal de ar de transporte dos frascos na LCB.**

	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		
	Ponto (1)	Ponto (2)	Ponto (1)	Ponto (2)	Ponto (1)	Ponto (2)	
<b>t (s)</b>	3,65	7,83	2,68	6,81	0,78	5,07	<b>Média</b>
<b><math>\Delta t</math> (s)</b>	4,18		4,13		4,29		4,20
<b><math>v</math> (m.s<sup>-1</sup>)</b>	9,33		9,44		9,09		9,29

**Tabela 4.7 – Tempo e velocidade de transporte dos frascos na conduta, em condições standard na LOA.**

	Ensaio 1		Ensaio 2		Ensaio 3		
	Ponto (1)	Ponto (2)	Ponto (1)	Ponto (2)	Ponto (1)	Ponto (2)	
<b>t (s)</b>	22,34	38,82	16,59	33,27	11,25	28,02	<b>Média</b>
<b><math>\Delta t</math> (s)</b>	16,48		16,68		16,77		16,64
<b><math>v</math> (m.s<sup>-1</sup>)</b>	4,85		4,80		4,77		4,81

Analisando os valores de velocidade obtidos na LCB nos dois ensaios realizados, ou seja antes e depois da redução da velocidade de transporte dos frascos, conclui-se que foi possível transportar os frascos com velocidade 27% inferior.

Comparando os resultados das duas fábricas, a LOA transporta os frascos com uma velocidade 62% mais baixa do que a LCB antes da redução da velocidade e 48% mais baixa depois da redução da velocidade.

## 4.6. Temperatura dos frascos

A medição da temperatura dos frascos à entrada das condutas, nas fábricas de Castelo Branco e de Oliveira de Azeméis, teve como objectivo verificar se existiam ou não diferenças significativas neste parâmetro, que pudessem influenciar a formação de ráfias. Tal como é referido na literatura, a temperatura do material transportado, ou seja neste caso a temperatura dos frascos, pode influenciar a formação de ráfias.

Após a medição e análise dos valores da temperatura dos frascos, nas duas fábricas, conclui-se que não existem diferenças que apontem para a influência deste factor na formação da ráfia. Futuramente, no período de Verão, com a temperatura ambiente mais elevada, será mais evidente a influência ou não desta nas características de transporte e na formação da ráfia.

Como a influência da temperatura dos frascos à entrada da conduta, após a análise dos valores recolhidos, não foi considerada uma causa principal para o problema da formação de ráfias, os valores respeitantes a este estudo encontram-se no Anexo B.

#### 4.7. Coeficientes de atrito

O objectivo dos testes de atrito foi perceber se existiam diferenças de atrito entre o material da conduta de transporte dos frascos da fábrica de Castelo Branco e os frascos da fábrica de Oliveira de Azeméis. Com os resultados obtidos pretendeu-se também avaliar se, o facto dos dois tipos de frascos (Danone versus Adágio) serem fabricados com matéria-prima secundária diferente (Tabela 4.8) influenciava ou não o atrito entre os frascos e as superfícies de contacto.

**Tabela 4.8 – Matérias-primas utilizadas no fabrico dos frascos.**

	<b>LCB (Danone)</b>	<b>LOA (Adágio)</b>
<b>Matéria-prima principal</b>	HDPE	HDPE
<b>Matéria-prima secundária</b>	Aditivo (concentrado de carbonato de cálcio em polietileno)	Corante (Masterbatch)

O equipamento onde foram realizados os testes tribológicos possui uma célula de carga lateral que suporta e traduz o momento resistente devido à força de atrito, permitindo a determinação da mesma. Sendo conhecido o valor da carga normal aplicada em cada ensaio, é possível, através da equação 2.5, determinar o coeficiente de atrito,  $\mu$ , em tempo real. Este cálculo é obtido através do *software* do computador, referido na secção 3.4. A partir destes valores, determinou-se o coeficiente de atrito cinético em regime estacionário, isto é, sem considerar eventual período transitório inicial correspondente à “rodagem” das superfícies de contacto para cada par de material testado. Após o conhecimento do coeficiente de atrito cinético em regime estacionário, fez-se a média dos resultados obtidos nos três ensaios, obtendo-se, para cada par testado, os resultados apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Coeficiente de atrito cinético para cada par (placa-pino).

Placa	Pino	Coeficiente de atrito
PVC novo	Danone	0,08
	Adágio	0,14
PVC usado	Danone	0,10
	Adágio	0,13
Inox	Danone	0,17
	Adágio	0,18
HDPE	Danone	0,48
	Adágio	0,49

Analisando os resultados obtidos não se identificam diferenças significativas entre os frascos da Danone e da Adágio, respectivamente frascos das fábricas de Castelo Branco e de Oliveira de Azeméis. Apesar das diferenças mínimas, os coeficientes de atrito são menores no caso dos frascos da Danone. Relativamente ao fabrico dos frascos, tal como referido anteriormente, existe uma diferença na matéria-prima secundária utilizada. Os resultados obtidos para os coeficientes de atrito cinético levam a concluir que, apesar dessa diferença, a mesma não é suficiente para provocar disparidades ao nível do atrito resultante.

Dos resultados apresentados na Tabela 4.9, identifica-se uma placa (HDPE) que apresenta valores de coeficiente de atrito nitidamente superiores aos apresentados pelas restantes placas, em ambos os tipos de frascos. A utilização de condutas (troços rectos e curvas) neste material deve ser evitada pois o atrito será elevado o que pode provocar degradação excessiva do material transportado, ou seja dos frascos para iogurte.

Analisando os resultados obtidos para as placas PVC usado e PVC novo, não são observadas diferenças significativas. Ambas as placas são as que apresentam menores valores de coeficiente de atrito. A superfície das placas de PVC usado apresentava alguma rugosidade, explicada pelo facto de esta estar a ser usada no transporte dos frascos na fábrica, no entanto a mesma não apresentava desgaste. Comparando os resultados obtidos das placas em PVC com os obtidos para as placas em inox, estes são um pouco mais elevados no entanto, os valores de coeficiente de atrito obtidos para esta placa podem também ser considerados relativamente baixos. Os resultados obtidos sugerem que, de todos os materiais testados, o mais adequado é o PVC.

Apesar da validade dos testes de atrito realizados em laboratório a extrapolação dos resultados obtidos para a realidade industrial deverá ser feita com algumas precauções, uma vez que as condições em que os testes foram realizados poderão não estar de acordo com as condições de transporte nas fábricas o que pode influenciar os

valores dos coeficientes de atrito. Estas condições poderão ter a ver com a frequência, com a força aplicada ou com a temperatura de realização dos testes. Para uma avaliação mais aprofundada, o ideal seria avaliar o comportamento de ambos os frascos em ambas as condutas, e não apenas das condutas da fábrica da LCB, e conjuntamente variar as condições dos ensaios (frequência e/ou velocidade).

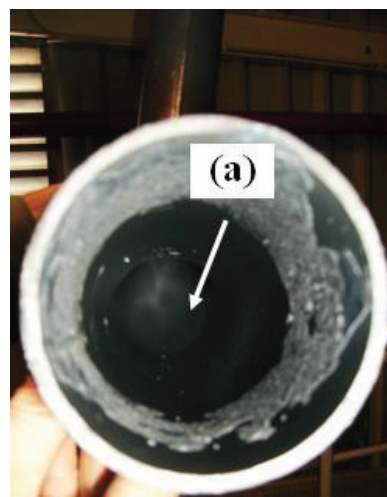
No Anexo B encontram-se os gráficos respeitantes a estes ensaios.

#### 4.8. Estado actual das condutas na fábrica LCB

Além dos dados expostos anteriormente que confirmam a quase total resolução do problema, este facto também pode ser comprovado pela observação do interior das condutas (troços rectos e curvas). Em seguida apresentam-se fotografias de dois troços das condutas da fábrica LCB, actualmente.



**Figura 4.13 – Troço recto em PVC, antes do silos de armazenamento dos frascos.**



**Figura 4.14 – Curva de 90° em PVC, antes do silo de armazenamento dos frascos.**

Comparando as figuras 4.13 e 4.14 com as figuras 4.2 a 4.4 podem observar-se algumas diferenças. Tal como seria de esperar, o troço recto em PVC continua a apresentar alguma rugosidade, devido ao uso continuado do mesmo. No entanto, o mesmo já não apresenta ráfias no seu interior. Relativamente à curva de 90° em PVC as diferenças são muito significativas. A maior acumulação de ráfias, antes da redução do caudal de ar de transporte dos frascos era no ponto (a) – Figura 4.4, no entanto a mesma curva actualmente já não apresenta a referida acumulação de material, o que pode ser comprovado pela observação da Figura 4.14.

## 4.9. Modelo para estimativa do tempo de transporte dos frascos na conduta

A velocidade de transporte dos frascos, tal como foi constatado anteriormente, é um factor de extrema importância na quantidade de ráfias formada. Por este motivo é importante estimar o seu valor para, dependendo das características do transporte, conseguir minimizar a formação de ráfias. Para tal foi desenvolvido um modelo, ainda que muito simples, que permite estimar o tempo que os frascos demoram a percorrer a conduta e indirectamente a velocidade de transporte dos mesmos. As aproximações/simplificações feitas foram várias, entre as quais deve destacar-se: (i) o facto de se considerar escoamento isotérmico uma vez que não foi possível fazer medições de temperatura ao longo da conduta, (ii) não se considerar o efeito directo das paredes da conduta sobre o escoamento dos frascos (i.e. escoamento em meio infinito) e (iii) não se considerar o facto da perda de carga do ar poder ser afectada pela presença dos frascos.

Para conseguir estimar o tempo de transporte dos frascos é determinante saber a queda de pressão existente ao longo da conduta de transporte. Por este motivo, será essencial começar por estimar a queda de pressão ao longo da conduta de transporte dos frascos. Actualmente, embora existam poucos modelos fiáveis para prever a queda de pressão para o fluxo gás-sólido em condutas, os modelos para o fluxo monofásico de gás estão bem estabelecidos. Tal como referido anteriormente, no capítulo 2, a queda de pressão numa conduta vazia, onde se considera apenas o transporte do ar, é uma consideração importante no projecto de um sistema de transporte pneumático [13].

### 4.9.1. Estimativa da queda de pressão ao longo da conduta

Para o cálculo da queda de pressão na conduta, considerando apenas a contribuição do ar, tomou-se como ponto de partida a equação diferencial de *Bernoulli*. Esta considera o escoamento isotérmico de um gás ideal e compressível numa conduta [42].

$$d\left(\frac{u^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} + dF + g dz = 0 \quad 4.1$$



➤ **Definição dos parâmetros da equação 4.5**

O diâmetro da conduta é igual em todos os troços e tem o valor de 0,075 m. Cada troço identificado na Figura 4.15, além de considerar a secção recta da conduta, considera também as curvas existentes. No cálculo da queda de pressão, a contribuição das curvas pode ser representada pelo comprimento equivalente das mesmas, tal como foi explicado na secção 2.4.2. Na literatura existem dados tabelados para este comprimento equivalente. Os comprimentos equivalentes das curvas existentes na conduta em estudo são 2,25 m para a curva de 90° (curva a vermelho na Figura 4.15) e 1,2 m para a curva longa (curva a verde na Figura 4.15) [43]. O comprimento total de cada troço da conduta, ou seja o comprimento da secção recta mais o comprimento equivalente da curva, e da altura dos mesmos encontram-se compilados na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10 – Comprimento total de cada troço da conduta e respectiva altura.**

<b>L<sub>i</sub> (m)</b>		<b>h<sub>i</sub> (m)</b>	
<b>L<sub>1</sub></b>	0,00	<b>h<sub>1</sub></b>	0,0
<b>L<sub>2</sub></b>	5,75	<b>h<sub>2</sub></b>	3,5
<b>L<sub>3</sub></b>	16,95	<b>h<sub>3</sub></b>	3,5
<b>L<sub>4</sub></b>	48,15	<b>h<sub>4</sub></b>	18,5
<b>L<sub>5</sub></b>	58,40	<b>h<sub>5</sub></b>	18,5

Para o cálculo da velocidade mássica ( $G$ ) é necessário determinar a velocidade do ar à entrada da conduta de transporte ( $u_1$ ) e a densidade do ar neste ponto. Os cálculos referentes a estas determinações encontram-se no Anexo C. Após estes cálculos, pela equação 4.3, determina-se  $G$ :

$$G = u_1 \times \rho = 27,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$$

O valor do coeficiente de atrito de Fanning,  $f_F$ , que depende do número de Reynolds ( $Re$ ) e da rugosidade relativa ( $\varepsilon/d$ ), é obtido a partir do Diagrama de Moody (Figura C. 3). Os cálculos referentes ao  $Re$  e à rugosidade relativa de cada troço encontram-se no Anexo C.

$$f_F \left( Re = 1,11 \times 10^5, \overline{\left( \frac{\varepsilon}{d} \right)} = 4,00 \times 10^{-5} \right) = 0,0045$$

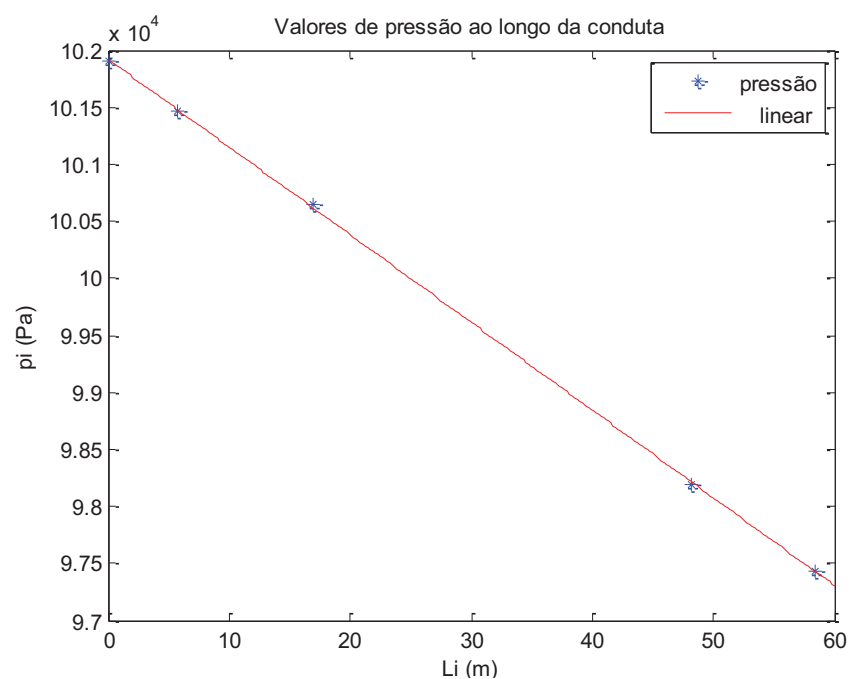
➤ **Valores obtidos para a queda de pressão**

Após determinação de todos os parâmetros da equação 4.5, apesar das aproximações existentes, estima-se a pressão em cada troço da conduta. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11 – Pressão do ar em cada ponto da conduta.**

$L_i$ (m)	$p_i$ (Pa)
0,00	101917
5,75	101460
16,95	100655
48,15	98200
58,40	97435

A partir destes resultados fez-se uma representação gráfica da pressão ao longo do comprimento da conduta (Figura 4.16).



**Figura 4.16 – Pressão do ar em cada troço da conduta.**

A equação da recta representada na Figura 4.16 é:

$$p_i = -76,91 \times L_i + 101917$$

**4.6**



Os termos presentes nesta equação são:

$$p_i = \frac{\Delta p}{L} \times L_i + p_{01} \quad 4.7$$

A partir dos resultados obtidos, é possível estimar a queda de pressão em cada troço da conduta ( $\Delta p_i$ ) e a queda de pressão total na conduta ( $\Delta p$ ). A primeira calcula-se pela equação 4.8 e a segunda pela equação 4.9. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 4.12.

$$\Delta p_i = p_i - p_{i-1} \quad 4.8$$

e

$$\Delta p = -76,91 \times L_{i=5} \quad 4.9$$

**Tabela 4.12 – Queda de pressão em cada troço da conduta e no comprimento total da mesma.**

$L_{i,i+1}$ (m)	$ \Delta p_i $ (Pa)	$ \Delta p $ (Pa)
$L_{12}$	450	4491,54
$L_{23}$	810	
$L_{34}$	2450	
$L_{45}$	760	

A queda de pressão numa conduta depende do comprimento e diâmetro da mesma, do coeficiente de fricção baseado na rugosidade da conduta, da velocidade de escoamento, do modo de fluxo (regido pelo número de Reynolds), e da diferença de cota entre a entrada e a saída da conduta. Uma vez que, na conduta em estudo, estes parâmetros são todos constantes, excepto o comprimento da conduta e a diferença de cota, a variação da queda de pressão em cada troço vai depender unicamente destes dois parâmetros. Analisando os resultados obtidos para a queda de pressão em cada troço da conduta observa-se que esta é maior no troço  $L_{34}$ , ou seja este troço é o que mais contribui para a queda de pressão total na conduta. Este troço, além de ser o de maior comprimento, é o que apresenta maior cota, devido à sua inclinação. A junção destes dois factores explica a grande diferença entre os valores de  $\Delta p_i$  obtidos para este troço e para os restantes.

#### 4.9.2. Estimativa do tempo de transporte dos frascos na conduta

Para desenvolver um modelo que permita estimar o tempo de transporte dos frascos na conduta, partiu-se de um balanço de momento ao frasco:

$$m \frac{dv}{dt} = A_p(p_{bf} - p_{tf}) + \frac{1}{2} \rho C_D A_p (v_{ar} - v)^2 - mg_L \quad 4.10$$

Onde  $(v_{ar} - v)$  representa a velocidade relativa entre o ar e o frasco,  $A_p(p_{bf} - p_{tf})$  o incremento de momento absorvido pelo frasco pela diferença de pressão entre a base e o topo e  $mg_L$  a força da gravidade, sendo que  $g_L$  é a projecção da aceleração da gravidade na direcção do escoamento, a qual depende da posição  $L$  do frasco ao longo da conduta.

Sabendo que:

$$\frac{dL_i}{dt} \equiv v \quad 4.11$$

É possível expressar a equação 4.10 como um diferencial no espaço:

$$m \frac{dv}{dL_i} = A_p(p_{bf} - p_{tf}) + \frac{1}{2} \rho C_D A_p (v_{ar} - v)^2 - mg_L \quad 4.12$$

A equação 4.12 é uma equação diferencial ordinária não linear em  $v(L_i)$ . Como valor inicial tem-se  $v(0) \approx 0$ . Esta equação deverá ser integrada entre  $L_A=0$  e  $L_B$ , em que  $L_B$  representa o comprimento equivalente de toda a conduta uma vez que as curvas foram substituídas pelos respectivos comprimentos equivalentes (Figura 4.17).

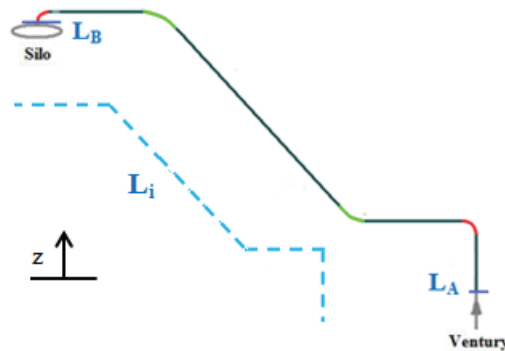


Figura 4.17 – Esquema da conduta de transporte dos frascos.

Então, o tempo que o frasco demora a percorrer a conduta, entre os pontos  $L_A$  ( $t=0$ ) e  $L_B$  ( $t=t$ ) é determinado pela seguinte expressão:

$$t = \int_{L_A}^{L_B} \frac{1}{v(L_i)} dL_i \quad 4.13$$

As considerações tidas em conta no desenvolvimento do presente modelo encontram-se no Anexo C. Por sua vez, os valores dos parâmetros necessários à resolução da equação encontram-se na Tabela 4.13. No que concerne os valores de  $G$ ,  $\Delta p/L$  e  $p_{01}$ , tal como já foi discutido anteriormente na secção 4.9.1, foram determinados a partir da equação diferencial de *Bernoulli*.

Tabela 4.13 – Parâmetros do modelo.

<b>m (kg)</b>	0,00950
<b>d<sub>f</sub> (m)</b>	0,0476
<b>L<sub>f</sub> (m)</b>	0,136
<b>L<sub>B</sub> (m)</b>	58,4
<b>G (kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>)</b>	27,2
<b>M<sub>w</sub> (kg.mol<sup>-1</sup>)</b>	2,89×10 <sup>-2</sup>
<b>ρ (kg.m<sup>-3</sup>)</b>	1,18
<b>R (Pa.m<sup>3</sup>.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>)</b>	8,31
<b>Δp/L (Pa.m<sup>-1</sup>)</b>	-76,9
<b>p<sub>01</sub> (Pa)</b>	101917

#### ➤ Resultados do modelo e análise da respectiva resposta

Para a resolução do presente modelo recorreu-se ao *Software Matlab* versão *R2006b*, utilizando a função *ODE45* que permitiu a integração de equações diferenciais ordinárias. Os comandos inseridos no *Matlab* encontram-se no Anexo D.

Com este modelo é possível avaliar a variação do tempo de transporte em função do coeficiente de arrasto bem como a variação da velocidade ao longo da conduta, as quais se encontram ilustradas nas Figuras 4.18 e 4.19 respectivamente. A análise da Figura 4.18 permite concluir que com o aumento do coeficiente de arrasto, o tempo de transporte dos frascos diminui e consequentemente a velocidade aumenta. A gama de valores considerada para o coeficiente de arrasto (0,44 – 1,9) encontra-se dentro da gama de valores apresentada na literatura para objectos submersos, em regime turbulento, com esfericidades compreendidas entre 0,7 e 1 (Figura C.4 – Anexo C).

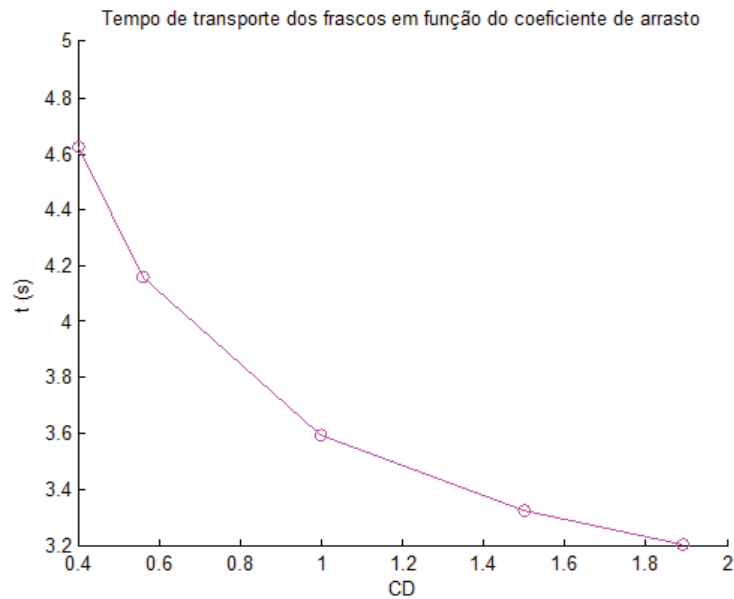


Figura 4.18 – Variação do tempo de transporte dos frascos em função do coeficiente de arrasto.

A Figura 4.19 representa, além da variação da velocidade do ar (linha de cor verde), a variação da velocidade de transporte dos frascos em função do comprimento da conduta em três situações distintas: (i) o coeficiente de arrasto depende do número de Reynolds (linha de cor azul); (ii) coeficiente de arrasto igual a 1,89 (pontos de cor preta); e (iii) coeficiente de arrasto igual a 0,56 (linha de cor ciano).

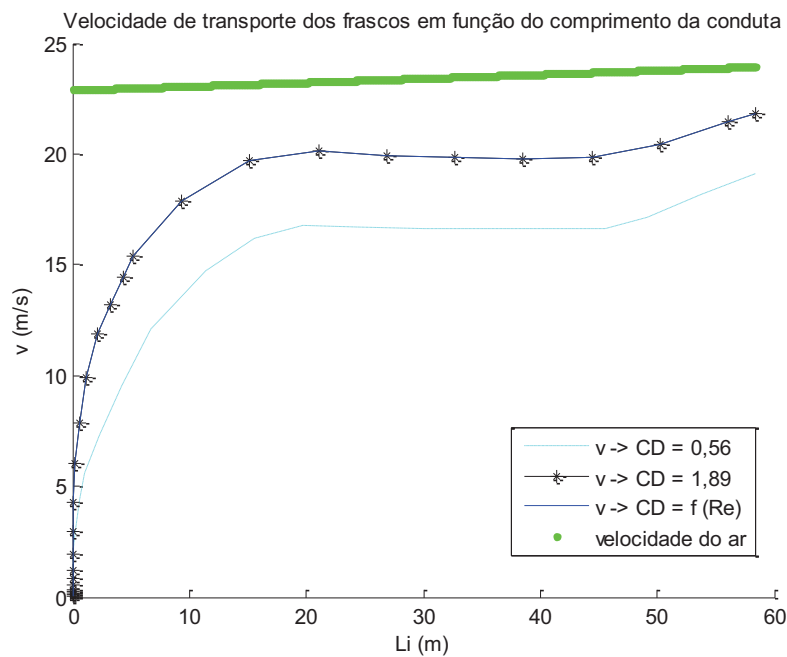


Figura 4.19 – Variação da velocidade de transporte dos frascos em função do comprimento da conduta.

Tendo em conta a esfericidade dos frascos calculada através da equação C.29 (Anexo C) e a dependência do coeficiente de arrasto face ao número de Reynolds foram consideradas três condições limite (equações C.30 a C.32 – Anexo C). Porém, uma vez que o escoamento dos frascos ao longo da conduta é feito em regime turbulento apenas o valor de  $C_D$  igual a 1,89 pode ser considerado, razão pela qual a linha a cor azul e os pontos a preto são coincidentes. Relativamente ao coeficiente de arrasto, determinado a partir do tempo médio experimental de 4,2 s (secção 4.5), este é igual a 0,56. Comparando os resultados obtidos da velocidade de transporte dos frascos ao longo da conduta, para aos coeficientes de arrasto de 1,89 e 0,56, pode-se concluir que a velocidade de transporte dos frascos ao longo da conduta é inferior para o  $C_D$  mais baixo (0,56) tal como seria de esperar através da observação da Figura 4.19.

O tempo de transporte dos frascos estimado, a partir do coeficiente de arrasto de 1,89, é igual a 3,2 s e o valor experimental é 4,2 s, o que corresponde a um erro de 31%. Uma vez que o modelo é muito simplificado, e que na resolução do mesmo foram utilizados valores aproximados dos caudais de ar utilizados na fábrica, além do cálculo da esfericidade dos frascos ter sido também aproximado, é notável a boa previsão do modelo. Tendo em conta que o modelo apenas considera um único frasco ao longo da conduta, enquanto que o valor experimental foi medido em condições de normal funcionamento, i.e. com diversos frascos a percorrer a conduta então, o valor de  $C_D$  igual a 0,56 ajustado aos dados experimentais corrige, entre outros efeitos, o da presença dos outros frascos na conduta levando assim a uma previsão bastante boa.

Tendo-se verificado experimentalmente que velocidades de transporte dos frascos mais baixas causam menor quantidade de ráfia formada, e tendo em conta os resultados obtidos neste modelo apontam no mesmo sentido, conclui-se que deverão ser utilizados tempos de transporte elevados. Uma vez que tal solução não é ideal, deve-se fazer um estudo mais aprofundado de todos os parâmetros que influenciam o tempo de transporte dos frascos. Neste contexto, deve realçar-se que o valor do coeficiente de arrasto não pode ser correlacionado directamente com a formação de ráfias sendo necessário fazer estudos sobre a relação do  $C_D$  com o coeficiente de atrito.

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. A empresa Logoplaste**

A Logoplaste é um grupo industrial, de capital português, que se dedica à produção de embalagens rígidas de plástico para algumas das empresas de referência no mundo em diversos sectores desde bebidas, alimentação, higiene pessoal, detergentes, óleos e lubrificantes. A missão da empresa é “ser a escolha natural no fornecimento de soluções inovadoras em embalagens rígidas de plástico”.

A fundação da empresa ocorreu em 1976, com o arranque das operações com a Yoplait (iogurtes) e com a Nestlé (tampas). Desde então, a Logoplaste é pioneira no desenvolvimento, na Europa e no resto do mundo, da produção *in-house*, através do conceito *hole in the wall*, fornecendo embalagens de plástico à medida das necessidades dos clientes em unidades integradas nas fábricas destes. Em 1994, a Logoplaste internacionaliza-se, para Espanha, com as águas minerais e no ano seguinte arranca com a produção no Brasil de produtos lácteos.

Actualmente, a Logoplaste gere 52 fábricas e mais de 250 equipamentos, em 17 países espalhados em 4 continentes. Em Portugal existem 17 fábricas distribuídas por uma grande parte do país.

Para a Logoplaste a questão da qualidade é um ponto fundamental, pois pretende satisfazer as expectativas dos parceiros e das suas unidades de produção através de um controlo rigoroso da conformidade dos produtos, assegurando a sua qualidade ao longo de toda a cadeia de valor, e melhoria contínua, de modo a conseguir o sucesso de ambas as partes. Com o objectivo de demonstrar o seu compromisso com a qualidade e a satisfação dos seus clientes, a empresa procedeu à certificação de alguns dos centros de produção nos referenciais da NP EN ISO 9001:2008 (Sistema de Gestão da Qualidade), e da NP EN ISO 22000:2005 (Sistema de Gestão da Segurança Alimentar). A sede da Logoplaste, em Cascais, encontra-se certificada pela primeira norma.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

Os objectivos desta Dissertação centraram-se na avaliação do comportamento do frasco na fase de transporte e a interacção destes com os materiais de contacto. Após esta avaliação pretendia-se actuar ao nível das infra-estruturas e dos materiais utilizados visando eliminar a degradação dos frascos, ou seja, a formação de ráfias. O objectivo último da eliminação das ráfias prendia-se com a redução do risco de contaminação física dos frascos para iogurte no âmbito da segurança alimentar.

A fim de se conhecer as causas para o problema da formação de ráfias procedeu-se a uma revisão da literatura sobre o transporte pneumático de partículas e os problemas de degradação subjacentes a ele, bem como sobre ferramentas da qualidade que permitissem implementar metodologias de análise e de resolução do problema em causa. A partir deste estudo, e da análise do problema na fábrica, foram identificadas possíveis causas para o problema, as quais foram organizadas recorrendo ao diagrama de causa-efeito. Em paralelo foi feito um levantamento das condições de produção na fábrica Logoplaste Oliveira de Azeméis, onde não se registavam problemas de formação de ráfias. Das causas apresentadas neste diagrama foram seleccionadas, como potenciais causas para a formação de ráfias a velocidade de transporte dos frascos, a geometria e número de curvas, as matérias-primas utilizadas no fabrico dos frascos e a temperatura dos frascos à entrada da conduta.

Após a análise dos resultados obtidos conclui-se que a velocidade de transporte dos frascos, tal como era referido na literatura, é um parâmetro fundamental do problema em estudo, e a sua redução levou à quase total eliminação de ráfias nas condutas de transporte dos frascos. Comparando os resultados obtidos referentes à temperatura dos frascos, nas duas fábricas, não existem grandes diferenças que possam apontar a temperatura como uma causa para a formação de ráfia. Dos materiais estudados, nos testes tribológicos, foi possível concluir que o PVC é o que proporciona menos atrito e não existe diferença significativa entre os frascos com e sem Masterbatch (Adágio *versus* Danone). Os resultados obtidos nestes testes levam também a concluir que se devem evitar condutas em HDPE pois o contacto entre estas e os frascos provoca valores de coeficiente de atrito elevados, o que poderá influenciar a quantidade de ráfia formada.

Durante a recolha de ráfia, nas condições standard ( $V_I$ ), observou-se que a quantidade de ráfia formada foi diminuindo. Esta diminuição poderá estar relacionada com a limpeza da conduta. Contudo, não foi possível concluir, inequivocamente, se este factor é na prática determinante devido ao reduzido número de medições realizadas. Dada a importância da limpeza das condutas, devido principalmente à constante formação de ráfias, seria importante quantificar o custo de cada limpeza. Tendo em conta que, o modo de limpeza utilizado actualmente consiste num sistema abrasivo que poderá danificar as condutas, provocando desgaste das mesmas, talvez fosse viável alterar o sistema de limpeza e, consoante os custos associados, efectuar as limpezas mais regularmente.

Por fim, tendo em conta a importância da velocidade de transporte dos frascos e a sua relação com a formação de ráfia, foi desenvolvido um modelo que permitisse estimar o tempo de transporte dos frascos na conduta, a partir do caudal de ar fornecido pelos ventiladores e das características das condutas. A partir do coeficiente de arrasto estimado (1,89), tendo como base a esfericidade dos frascos calculada e o escoamento dos frascos em regime turbulento, foi possível estimar o valor de 3,2 s para o tempo de transporte dos frascos, o qual apresenta um erro de 31% quando comparado com o valor medido experimentalmente. Tendo em conta a simplicidade do modelo desenvolvido, o facto da resolução do mesmo ter sido feita utilizando valores aproximados dos caudais de ar utilizados na fábrica e o facto do cálculo da esfericidade dos frascos ser aproximada é notável a boa previsão do modelo.

Em conclusão pode-se considerar que este modelo poderá constituir uma base de trabalho futuro, para estimativas de como alterar as condições de transporte (ao nível dos ventiladores utilizados, da quantidade de frascos produzidos e das características das condutas) sem alterar a quantidade de ráfia formada mantendo-a nula ou quase nula.



## REFERÊNCIAS

1. Sabic. Disponível em: [http://plastics.sabic.eu/technical/\\_en/dust.htm](http://plastics.sabic.eu/technical/_en/dust.htm). Acesso: (Dezembro 2009).
2. Harper, C.A., *Modern plastics handbook*. 2000, New York: McGraw-Hill.
3. Chanda, M. and Roy, S., *Plastics technology handbook*. 4th ed. 2006, New York: CRC Press.
4. Mark, H.F., *Volume 11*, in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. cop 2003-2004, John Wiley & Sons
5. Peacock, A.J., *Handbook of polyethylene: structures, properties, and applications*. 2000, Texas: Marcel Dekker
6. Mark, H.F., *Volume 2*, in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. cop 2003-2004, John Wiley & Sons
7. Odian, G., *Principles of polymerization*. 4th ed. 2004, Hoboken (NJ): Wiley - Interscience.
8. Mark, H.F., *Volume 1*, in *Encyclopedia of Polymer Science and Technology*. cop 2003-2004, John Wiley & Sons
9. Dhodapkar, S., Solt, P., and Klinzing, G., *Understanding Bends In Pneumatic Conveying Systems*. Chemical Engineering, 2009. **116**(4): p. 53-60.
10. Cartaxo, S.J.M. and Rocha, S.C.S., *Object-oriented simulation of the fluid-dynamics of gas-solid flow*. Powder Technology, 2001. **117**(3): p. 177-188.
11. Mills, D., Jones, M.G., and Agarwal, V.K., *Handbook of pneumatic conveying engineering*. 2004, New York: Marcel Dekker.
12. McGlinchey, D., *Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation*. 1st ed. 2008: Blackwell Publishing.
13. Mills, D., *Pneumatic Conveying Design Guide*. 2nd ed. 2004, Oxford: Butterworth-Heinemann.
14. Kalman, H. and Goder, D., *Design criteria for particle attrition*. Advanced Powder Technology, 1998. **9**(2): p. 153-167.
15. Carpinlioglu, M.Ö., Özbelge, T.A., and Oruc, V., *Flow frictional resistance in pneumatic conveying of solid particles through inclined lines*. Powder Technology, 2002. **125**(2-3): p. 292-297.
16. Molerus, O., *Overview: Pneumatic transport of solids*. Powder Technology, 1996. **88**(3): p. 309-321.
17. Baker, J.D. and Klinzing, G.E., *Optimal performance of pneumatic transport systems*. Powder Technology, 1999. **104**(3): p. 240-247.
18. Bhushan, B., *Principles and applications of tribology*. 1999: Wiley-IEEE.
19. Stachowiak, G.W. and Batchelor, A.W., *Engineering Tribology*. 2nd ed. 2001: Elsevier.
20. Bhushan, B., *Modern tribology handbook*. Vol. 1. 2001: CRC Press.

21. Bridle, I., Woodhead, S.R., and Reed, A.R., *The Analysis of Particle Degradation in Pneumatic Conveyors utilizing a Pilot-Sized Test Facility*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part E -- Journal of Process Mechanical Engineering, 1999. **213**(2): p. 85-91.
22. Konami, M., Tanaka, S., and Matsumoto, K., *Attrition of granules during repeated pneumatic transport*. Powder Technology, 2002. **125**(1): p. 82-88.
23. Deng, T., Farnish, R.J., and Bradley, M.S.A., *Evaluation of particle degradation due to high-speed impacts in a pneumatic handling system*. Particulate Science and Technology, 2008. **26**(5): p. 438-450.
24. Ghadiri, M. and Zhang, Z., *Impact attrition of particulate solids. Part 1: A theoretical model of chipping*. Chemical Engineering Science, 2002. **57**(17): p. 3659-3669.
25. Kalman, H. and Tardos, G.I., *Elements of particle technology in the chemical industry*. Particulate Science and Technology, 2005. **23**(1): p. 1-19.
26. Chapelle, P., Abou-Chakra, H., Christakis, N., Patel, M., Abu-Nahar, A., Tuzun, U., and Cross, M., *Computational model for prediction of particle degradation during dilute-phase pneumatic conveying: the use of a laboratory-scale degradation tester for the determination of degradation propensity*. Advanced Powder Technology, 2004. **15**(1): p. 13-29.
27. Kalman, H., *Attrition control by pneumatic conveying*. Powder Technology, 1999. **104**(3): p. 214-220.
28. Kalman, H., *Attrition of powders and granules at various bends during pneumatic conveying*. Powder Technology, 2000. **112**(3): p. 244-250.
29. Aarseth, K.A., *Attrition of Feed Pellets during Pneumatic Conveying: the Influence of Velocity and Bend Radius*. Biosystems Engineering, 2004. **89**(2): p. 197-213.
30. Salman, A.D., Hounslow, M.J., and Verba, A., *Particle fragmentation in dilute phase pneumatic conveying*. Powder Technology, 2002. **126**(2): p. 109-115.
31. Bridle, I. and Woodhead, S.R., *Particle degradation in pneumatic conveyors: use of data from a pilot-sized test facility to predict degradation in an industrial conveyor*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E-Journal of Process Mechanical Engineering, 2002. **216**(E2): p. 65-71.
32. Salman, A.D., Gorham, D.A., and Verba, A., *A study of solid particle failure under normal and oblique impact*. Wear, 1995. **186-187**(Part 1): p. 92-98.
33. Abou-Chakra, H., Chapelle, P., Tuzun, U., Baxter, J., Patel, M., Cross, M., Bridle, I., and Bradley, M.S.A., *Sampling issues in assessing particle degradation in pneumatic conveying systems*. Particle & Particle Systems Characterization, 2004. **21**(1): p. 39-46.
34. Ineos. Disponivel em: [http://www.ineos-op.com/jscripits/tiny\\_mce/plugins/filemanager/files/other\\_tech\\_info/angel\\_hair\\_and\\_streamers\\_tech\\_pub.pdf](http://www.ineos-op.com/jscripits/tiny_mce/plugins/filemanager/files/other_tech_info/angel_hair_and_streamers_tech_pub.pdf). Acesso: (Dezembro 2009).
35. Rosato, D. and Rosato, D., *Glossary*, in *Plastics Engineered Product Design*. 2003, Elsevier Science: Amsterdam. p. 493-546.
36. American Plastics Council Transportation & Logistics Committee, *Resin Handling Guide*. 2003, American Chemistry Council.

37. Omachonu, V.K., Ross, J.E., and Swift, J.A., *Principles of total quality*. 3rd ed. 2004: CRC Press.
38. Pereira, Z.L. and Requeijo, J.G., *Qualidade: planeamento e controlo estatístico de processos*. 2008, Lisboa: Prefácio.
39. Walton, M., *The deming management method*. 1988: Perigee.
40. Oakland, J.S., *Total quality management: text with cases*. 3rd ed. 2003: Butterworth-Heinemann.
41. Dale, B.G., *Managing quality*. 4th ed. 2003: Wiley-Blackwell.
42. Wilkes, J.O., *Fluid friction in pipes* in *Fluid mechanics for chemical engineers*, P. Hall, Editor. 1999.
43. Mott, R., *Pérdidas menores*, in *Mecánica de fluidos*. 2006, Pearson Educación. p. 278-319.
44. Wilkes, J.O., *Flow in chemical engineering equipment* in *Fluid mechanics for chemical engineers*, P. Hall, Editor. 1999.

## **ANEXOS**

### **ANEXO A**

Seguidamente apresenta-se o processo produtivo completo da Logoplaste Castelo Branco.

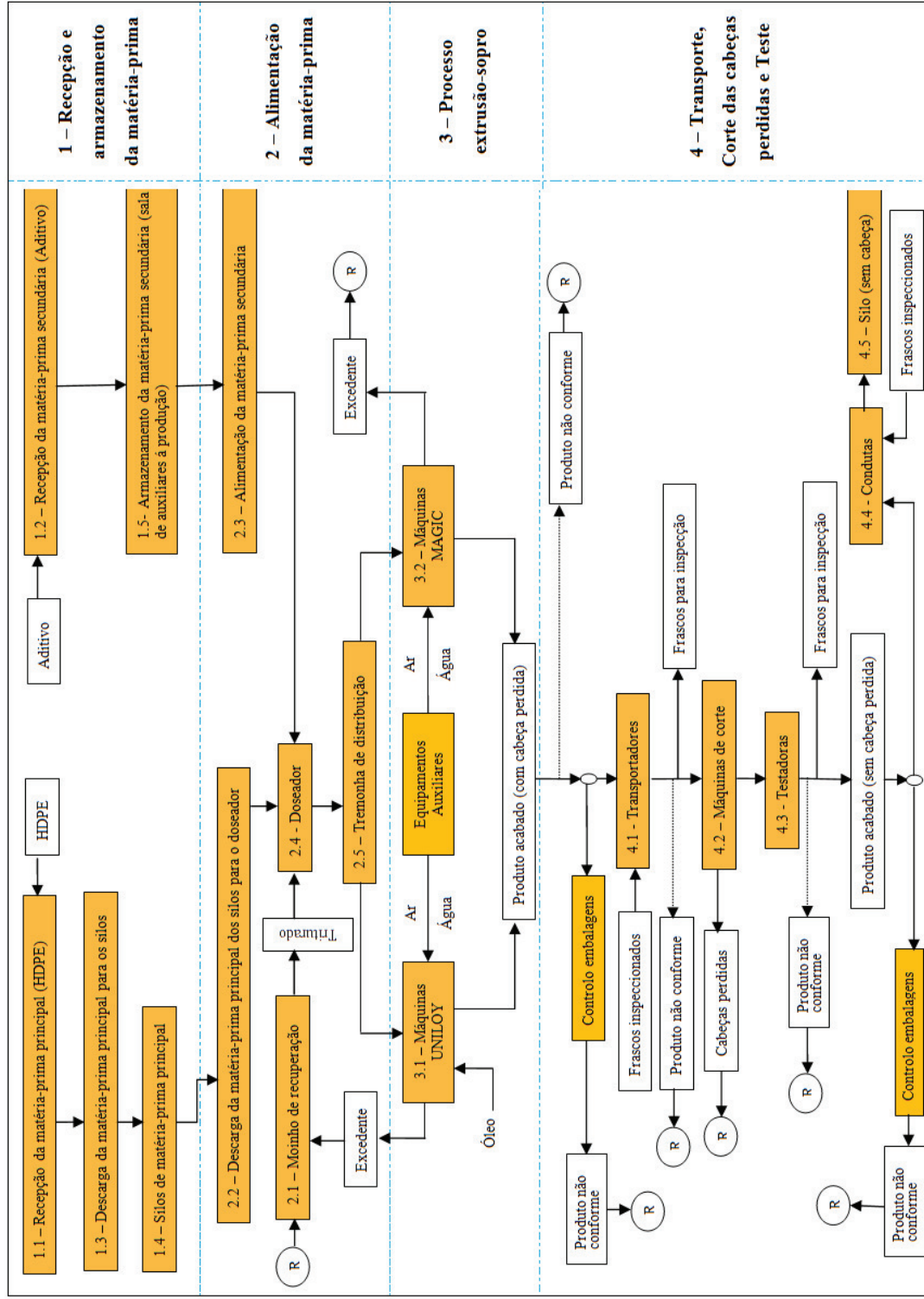


Figura A. 1 – Fluxograma do processo produtivo e transporte dos frascos da Logoplaste Castelo Branco.

## ANEXO B

### ➤ Coeficientes de atrito

Em seguida apresentam-se os gráficos respeitantes aos testes de atrito realizados no Laboratório de Tribologia do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Cada gráfico representa o coeficiente de atrito em função do tempo, para os três ensaios realizados. No caso da placa em PVC usado e do disco dos frascos Adágio apenas se realizaram dois ensaios devido à placa, após o segundo ensaio, não estar em condições para a realização do ensaio seguinte, uma vez que apresentava algum desgaste.

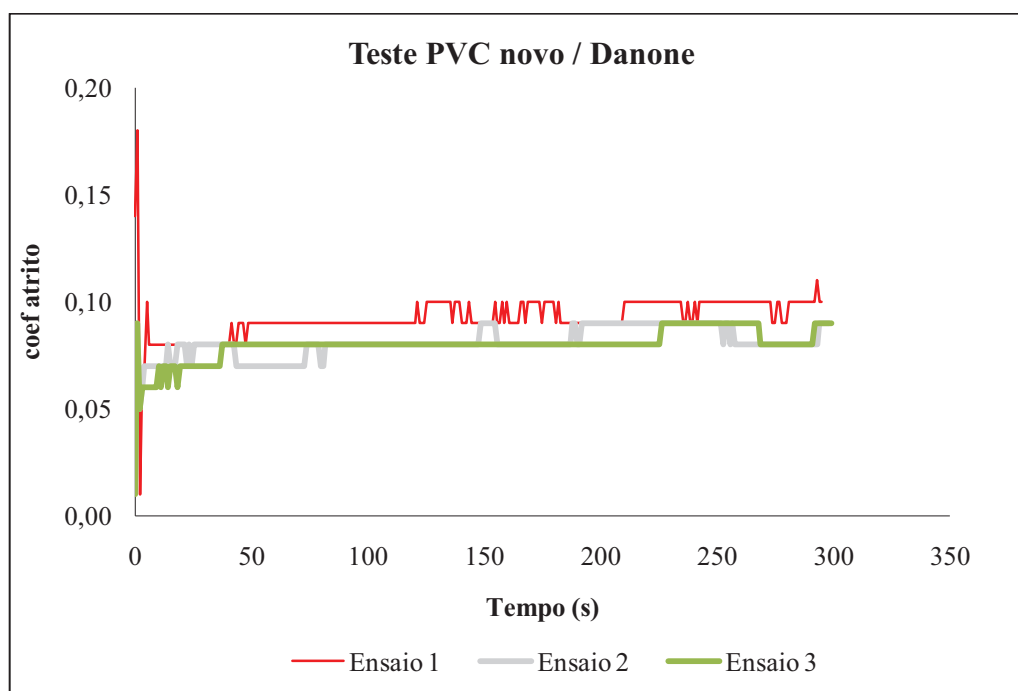


Figura B. 1 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa PVC novo e disco Danone.

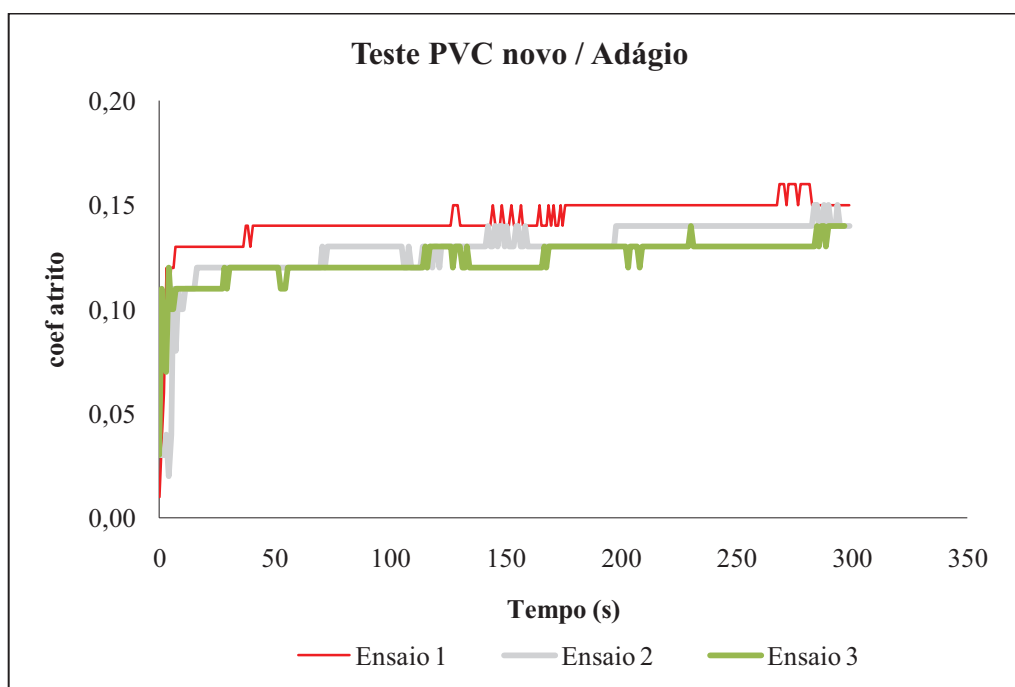


Figura B. 2 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa PVC novo e disco Adágio.

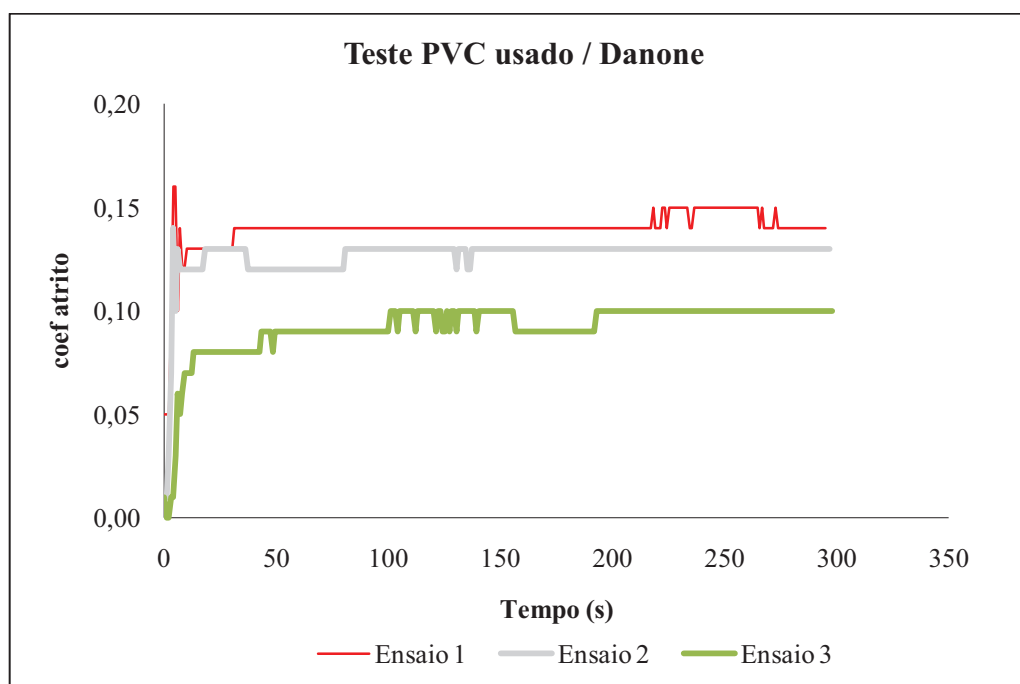


Figura B. 3 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa PVC usado e disco Danone.

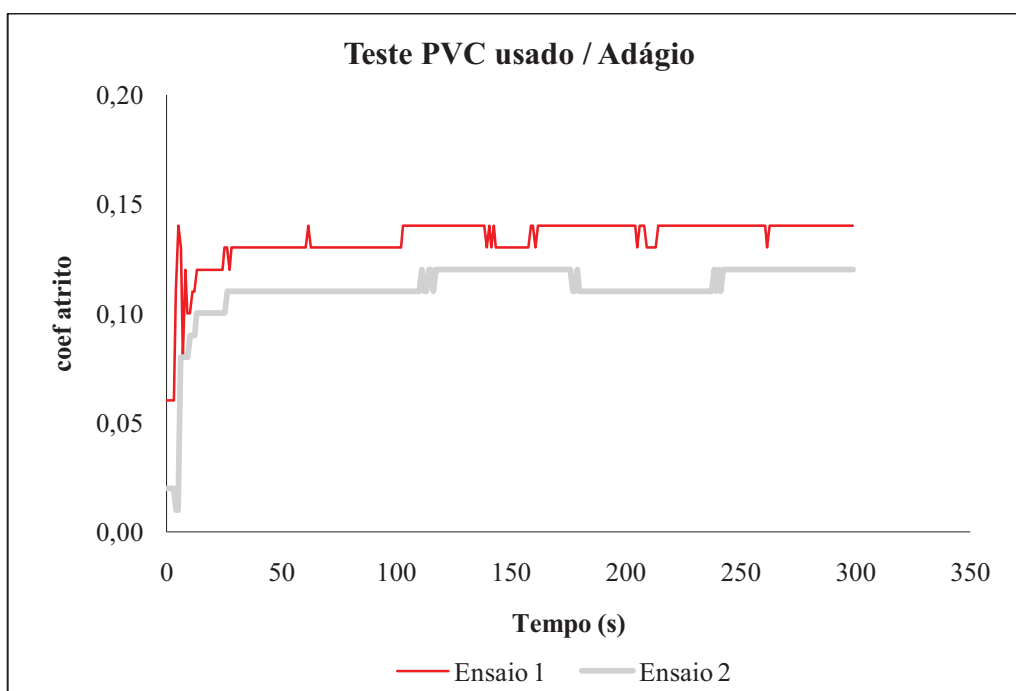


Figura B. 4 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa PVC usado e disco Adágio.

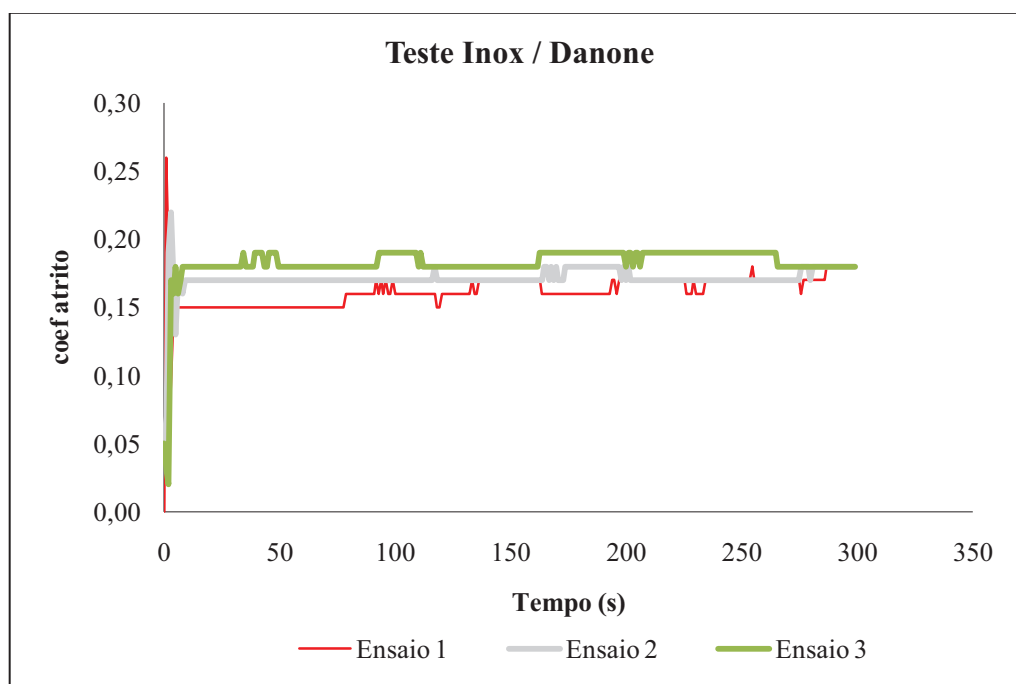


Figura B. 5 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa Inox e disco Danone.



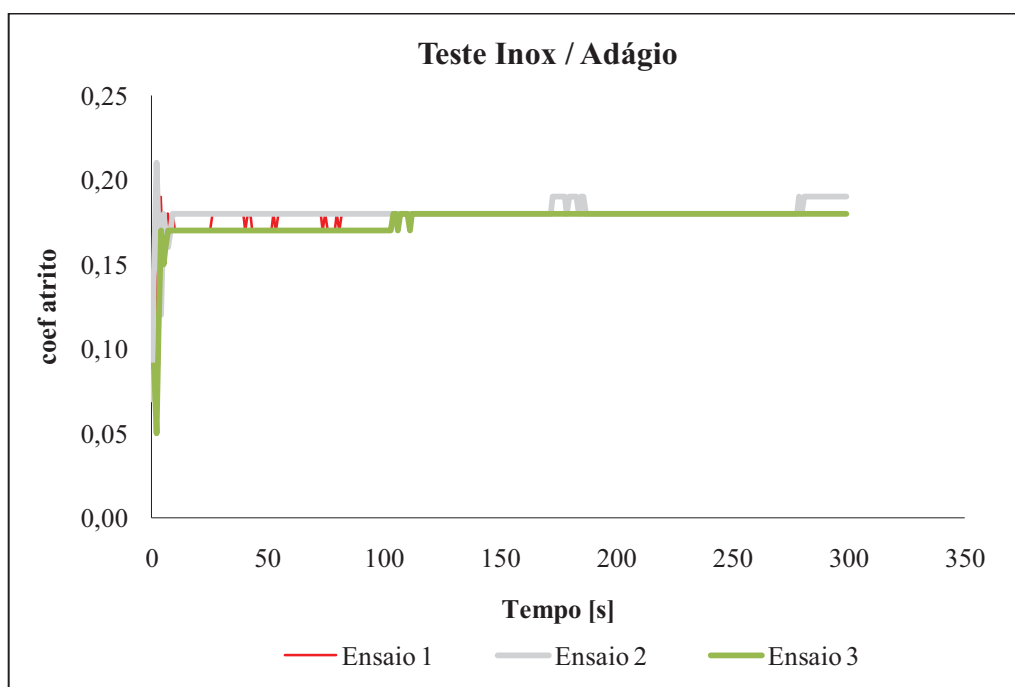


Figura B. 6 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa Inox e disco Adágio.

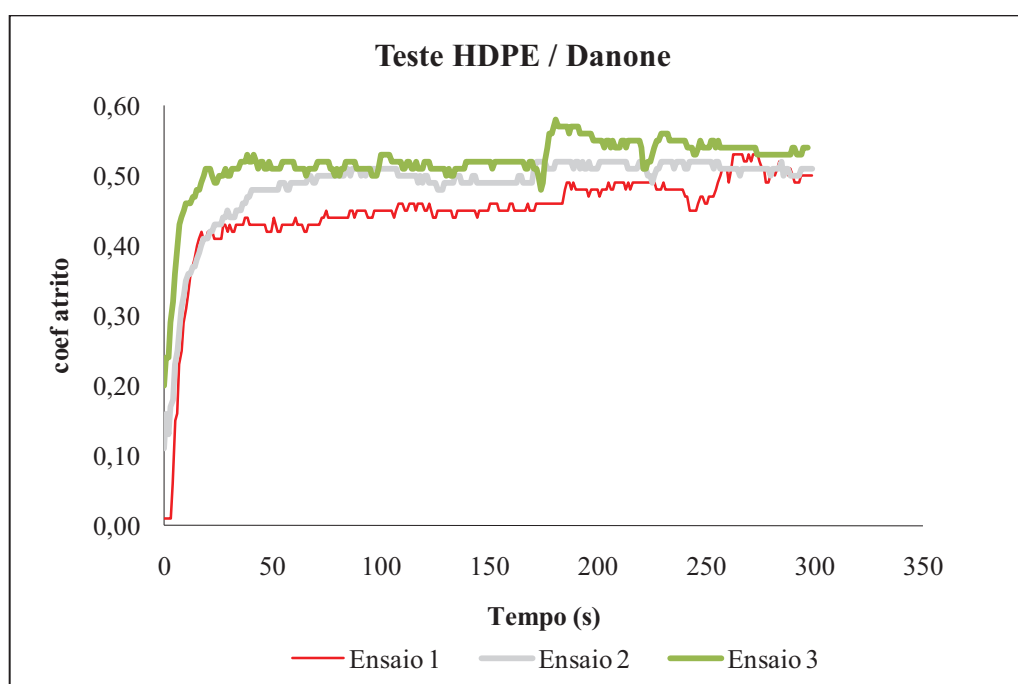


Figura B. 7 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa HDPE e disco Danone.

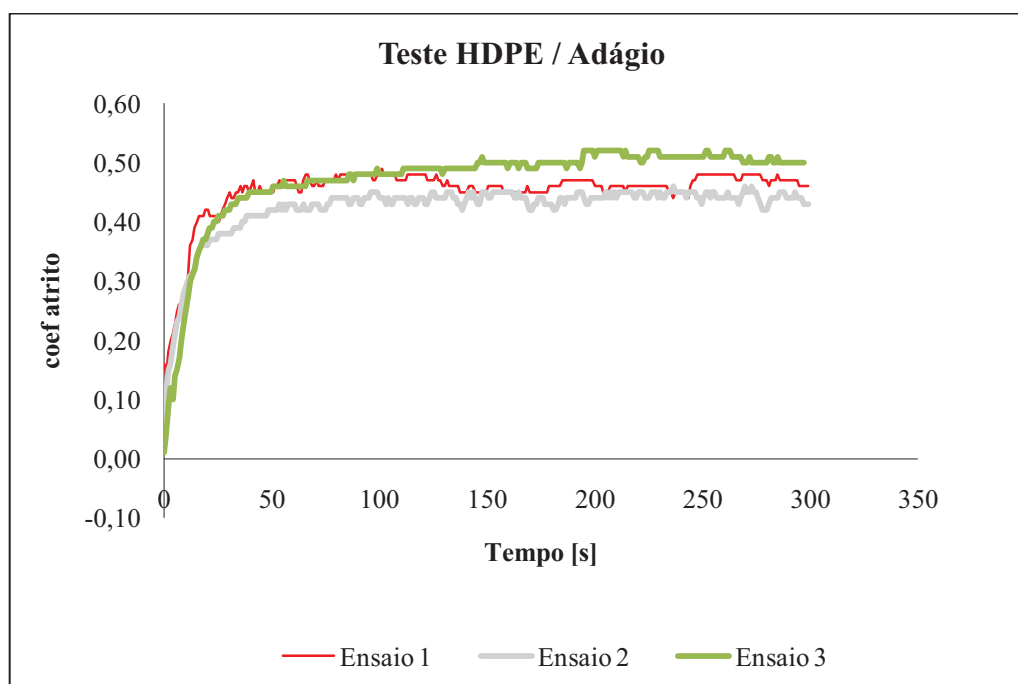


Figura B. 8 – Coeficiente de atrito em função do tempo, para o par placa HDPE e disco Adágio.

### ➤ Temperatura dos frascos

Os valores de temperatura dos frascos medidos na Logoplaste Castelo Branco e na Logoplaste Oliveira de Azeméis encontram-se compilados nas tabelas B.1 e B.2. No caso da fábrica LCB, uma vez que não se efectuou, em todas as máquinas de extrusão-sopro, medição da temperatura nos dois braços (esquerdo e direito) da máquina, os valores apresentados dizem respeito à temperatura média dos valores medidos nos dois braços (esquerdo e direito) e na última cavidade. No caso da fábrica LOA, a medição de temperatura foi efectuada em ambos os braços e em todas as cavidades.

Tabela B. 1 – Temperatura dos frascos à saída da máquina de extrusão-sopro e à entrada da conduta de transporte, na fábrica LCB.

Geometria	Frusion						Bio
Máquina	250	64	63	41	2053	251	154
T saída máquina (°C)	34,2	30,3	29,5	29,3	44,2	36,9	32,2
	34,6	32,0	27,3	32,6	45,7	38,5	35,1
	34,7	31,8	29,8	32,6	41,4	36,5	34,2
	34,8	30,1	28,7	32,4	41,0	36,5	33,3
T média saída máquina (°C)	34,6	31,0	28,8	31,7	43,0	37,1	33,7
T entrada conduta (°C)	36,9	31,3	Igual à máquina 64	31,3	38,9	33,5	27,8
	34,6	30,8		30,7	33	37,3	32,1
	35,2	31		30,2	35,7	36,9	30,2
	34	31,3		30,4	34,2	34,6	31,5
T média entrada conduta (°C)	35,2	31,1		30,7	35,5	35,6	30,4

Tabela B. 2 – Temperatura dos frascos à entrada da conduta de transporte, na fábrica LOA.

Máquina	T entrada conduta (°C)						T média entrada conduta (°C)
	Braço	Cavidade					
		1	2	3	4	5	
153	Braço direito	36,2	36,2	36,8	35,3	35,8	36,2
		36,3	36,2	38,8	35,6	35,8	
		36,2	36,0	36,3	35,3	36,1	
	Braço esquerdo	35,9	35,4	35,6	34,7	37,2	35,5
		35,2	35,6	36,2	35,0	34,9	
		34,8	35,8	36,2	34,9	34,8	
299	Braço direito	40,9	38,8	40,4	41,2	41,4	40,6
		38,3	37,8	40,9	41,2	43,2	
		43,2	39,9	40,6	41,3	40,0	
	Braço esquerdo	39,2	40,6	38,4	36,9	42,3	40,0
		40,8	39,2	38,5	40,7	41,3	
		40,3	38,1	41,6	41,0	40,7	

## ANEXO C

### ➤ Dedução da equação para estimativa da queda de pressão ao longo da conduta:

Para obter a equação que permite estimar a queda de pressão ao longo da conduta de transporte dos frascos, partiu-se da equação diferencial de Bernoulli. Esta considera escoamento isotérmico de um gás ideal e compressível ao longo de uma conduta [42].

$$d\left(\frac{u^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} + dF + g dz = 0 \quad \text{C. 1}$$

uma vez que:

$$dF = 2f_F u^2 \frac{dL_i}{D} \quad \text{C. 2}$$

e dividindo a equação C. 1 por  $u^2$  obtém-se:

$$\frac{du}{u} + \frac{dp}{\rho u^2} + 2f_F \frac{dL_i}{D} + g \frac{dz}{u^2} = 0 \quad \text{C. 3}$$

Devido à continuidade,  $G = \rho \times u$  é constante:

$$dG = 0 = \rho du + u d\rho \quad \text{C. 4}$$

Como a densidade é proporcional à pressão absoluta:

$$\frac{du}{u} = -\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dp}{p} \quad \text{C. 5}$$

e também:

$$\frac{1}{\rho u^2} = \frac{\rho}{G^2} = \frac{\rho_1}{p_1} \frac{p}{G^2} \quad \text{C. 6}$$

Das equações C. 3, C. 4 e C. 6, resulta:

$$-\int_{p_A}^{p_B} \frac{dp}{p} + \frac{\rho_1}{p_1 G^2} \int_{p_A}^{p_B} p dp + \frac{2f_F}{D} \int_{L_A}^{L_B} dL_i + \frac{g\rho^2}{G^2} \int_{h_A}^{h_B} dz = 0 \quad \text{C. 7}$$

$G$  é constante, a viscosidade do gás é virtualmente independente da pressão, então o número de Reynolds,  $Re = \rho u D / \mu = G D / \mu$ , é essencialmente constante. Uma vez que o coeficiente de atrito de Fanning,  $f_F$ , depende apenas do número de Reynolds e da rugosidade relativa, é justificável que ele permaneça fora do integral na equação C. 7. Efectuando a integração, presente nesta equação, resulta:

$$-\ln\left(\frac{p_B}{p_A}\right) + \frac{\rho_1}{p_1 G^2} \left(\frac{p_B^2 - p_A^2}{2}\right) + \frac{2f_F}{D} (L_B - L_A) + \frac{g\rho^2}{G^2} (h_B - h_A) = 0 \quad \text{C. 8}$$

Multiplicando todos os termos da equação anterior por 2 obtém-se:

$$\begin{aligned} -\ln\left(\frac{p_B}{p_A}\right)^2 + \frac{\rho_1}{p_1 G^2} (p_B^2 - p_A^2) + \frac{4f_F}{D} (L_B - L_A) + \frac{2g\rho^2}{G^2} (h_B - h_A) \\ = 0 \end{aligned} \quad \text{C. 9}$$

Sabendo que:

$$\frac{\rho_1}{p_1} = \frac{M_w}{RT} \quad \text{C. 10}$$

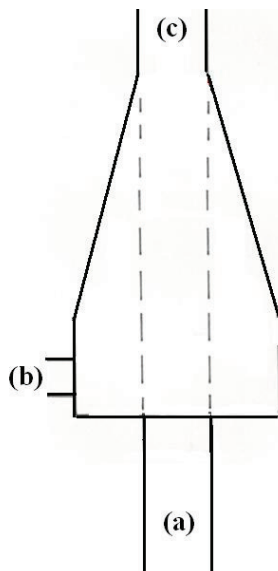
e desprezando o termo  $-\ln\left(\frac{p_B}{p_A}\right)^2$ , assumindo que este é significativamente inferior à unidade, obtém-se a equação que permite estimar a queda de pressão entre a entrada e a saída da conduta:

$$(p_B^2 - p_A^2) = -\frac{RTG^2}{M_w} \left( \frac{4f_F}{D} (L_B - L_A) + \frac{2g\rho^2}{G^2} (h_B - h_A) \right) \quad \text{C. 11}$$

A equação C. 11 é uma adaptação da equação de Weymouth, a qual considera escoamento isotérmico de um gás ideal e compressível ao longo de uma conduta horizontal [42].

➤ **Cálculo da velocidade do ar à entrada da conduta,  $u_1$**

A velocidade do ar à entrada da conduta determina-se a partir do caudal volumétrico de ar neste ponto, no entanto para tal, é necessário determinar os caudais de ar nas duas entradas do Ventury, pontos (a) e (b) – Figura C. 1.



**Figura C. 1 – Esquema do Ventury: (a) ar proveniente do ventilador; (b) ar atmosférico e (c) ar à saída do Ventury.**

Para calcular o caudal de ar no ponto (b) é necessário saber o caudal de ar à saída do ventilador,  $\dot{V}_s$ . O caudal de ar debitado pelo ventilador é  $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  no entanto, como não se conhece a pressão à saída do ventilador, considerou-se que o caudal  $\dot{V}_s$  é igual ao caudal debitado, ou seja  $0,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . O caudal de ar que sai do ventilador, tal como referido na secção 1.2.2, não é utilizado apenas para o envio dos frascos, uma vez que parte dele é utilizado para o envio das cabeças perdidas, tal como ilustra a Figura C. 2. O diâmetro da conduta à saída do ventilador (0,10 m) é igual ao diâmetro da conduta que envia o ar para transporte dos frascos. No entanto, o diâmetro da conduta de envio do ar para o transporte das cabeças perdidas é de apenas 0,075 m. Por este motivo, o caudal de ar no ponto (b) –  $V_b$  considerou-se 3/4 do caudal  $\dot{V}_s$ , ou seja,  $V_b$  igual a  $0,075 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

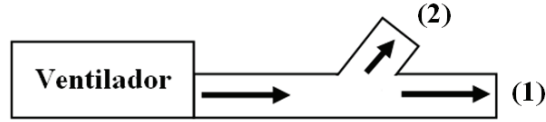


Figura C. 2 – Esquema da divisão de ar proveniente do ventilador: (1) ar para o transporte dos frascos; (2) ar para transporte das cabeças perdidas.

Para determinar o caudal de ar no ponto (a) –  $V_a$  é necessário recorrer aos seguintes balanços:

- 1) Balanço material ao ar no Ventury:

$$\rho_c V_c = \rho_a V_a + \rho_b V_b \quad \text{C. 12}$$

Considerando que  $\rho_c = \rho_a = \rho_b$ , uma vez que a variação da pressão ao longo da conduta é baixa, então:

$$V_c = V_a + V_b \quad \text{C. 13}$$

- 2) Balanço de energia mássico entre os pontos (a) e (c):

$$\frac{p_c - p_a}{\rho g} + \frac{u_3^2 - u_1^2}{2g} = 0 \quad \text{C. 14}$$

- 3) Balanço de energia entre os pontos (b) e (c):

$$\frac{p_b - p_a}{\rho g} + \frac{u_b^2 - u_1^2}{2g} = 0 \quad \text{C. 15}$$

- 4) Balanço de momento:

$$p_a A_a + p_b A_b - p_c A_c + \rho(V_a u_a + V_b u_b - V_c u_c) = 0 \quad \text{C. 16}$$

A relação entre o caudal e a velocidade do ar é:

$$V_i = u_i \times A_i \quad \text{C. 17}$$

A área da conduta de transporte dos frascos é:

$$A_i = \frac{\pi}{4} \times d_i^2 \quad \text{C. 18}$$

Resolvendo as equações C. 12 a C. 18, em ordem ao caudal  $V_a$ , determina-se o caudal, a velocidade e a pressão do ar nos pontos (a) e (c). Os resultados obtidos encontram-se na Tabela C. 1.

**Tabela C. 1 – Caudal, velocidade e pressão do ar nos pontos (a) e (c).**

Ponto	$Q \text{ (m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$u \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$	$p \text{ (Pa)}$
(a)	0,0265	8,24	101325
(c)	0,102	32,6	101912

Uma vez que o diâmetro da conduta no ponto (c) não é igual ao diâmetro da conduta de transporte dos frascos é necessário determinar a velocidade do ar ( $u_1$ ) para este diâmetro. Pela relação da velocidade do ar em duas áreas diferentes fica:

$$u_1 = \frac{u_c \times A_c}{A_1} \quad \text{C. 19}$$

A área  $A_c$  é igual a  $0,00312 \text{ m}^2$  então, pela equação anterior obtém-se  $u_1$  igual a  $23,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

#### ➤ Cálculo da velocidade mássica, G

Para o cálculo da velocidade mássica, primeiro é necessário determinar o valor da densidade do ar, sendo que esta depende da pressão e da temperatura, tal como ilustra a equação C. 20:

$$\rho = \frac{M_w}{RT} \times p \quad \text{C. 20}$$



O valor da pressão à entrada da conduta de transporte é 101325 Pa e a temperatura, no mesmo ponto, é 298K. Então pela equação anterior obtém-se:

$$\rho = \frac{2,89 \times 10^{-2}}{8,31 \times 298} \times 101325 = 1,18 \text{ kg.m}^{-3} \quad \text{C. 21}$$

A velocidade mássica determina-se pela equação 4.3:

$$G = u_1 \times \rho = 27,20 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$$

➤ **Cálculo do número de Reynolds,  $Re$**

$$Re = \frac{G \times d}{\mu} \quad \text{C. 22}$$

Os valores da velocidade mássica, do diâmetro da conduta e da viscosidade do ar são respectivamente 27,20 kg.m<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>, 0,075 m e 1,84×10<sup>-5</sup> Pa.s. Então, o número de Reynolds ( $Re$ ) é igual a 1,11×10<sup>5</sup>.

➤ **Cálculo da rugosidade relativa,  $\varepsilon / d$**

A conduta de transporte dos frascos apresenta troços em PE e troços em PVC, sendo que a rugosidade destes materiais, presente na literatura, é respectivamente 0,001 e 0,005 mm [43]. O diâmetro da conduta é o mesmo para os dois materiais e igual a 75 mm.

**Tabela D. 1 – Valores da rugosidade relativa, para os dois materiais da conduta.**

Material da conduta	PE	PVC
$\varepsilon / d$	1,33×10 <sup>-5</sup>	6,67×10 <sup>-5</sup>

Uma vez que os valores da rugosidade relativa dos dois materiais da conduta são bastantes baixos, o  $f_F$  irá ser aproximadamente igual para os dois materiais, razão pela qual se irá utilizar o valor médio de rugosidade do PVC e do PE (4,00×10<sup>-5</sup>) para o cálculo do coeficiente de atrito de Fanning.

### ➤ Diagrama de Moody

Em seguida apresenta-se o diagrama de Moody, a partir do qual se determinou o coeficiente de atrito de Fanning necessário para estimar a queda de pressão ao longo da conduta de transporte dos frascos.

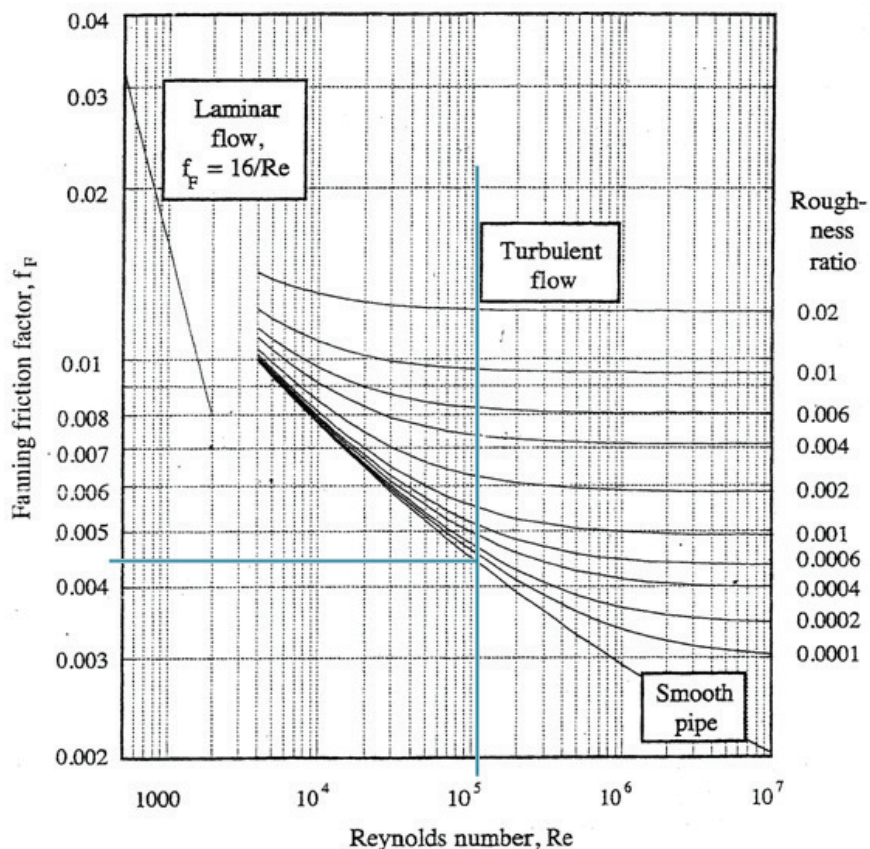


Figura C. 3 – Diagrama de Moody.

### ➤ Considerações tidas em conta no desenvolvimento do modelo para estimativa do tempo de transporte dos frascos na conduta

O ponto de partida para obter a equação que irá permitir a estimativa do tempo de transporte dos frascos na conduta é o balanço de momento ao frasco na conduta:

$$m \frac{dv}{dL_i} = A_p(p_{bf} - p_{tf}) + \frac{1}{2} \rho C_D A_p (v_{ar} - v)^2 - mg_L \quad \text{C. 23}$$

Os termos do lado direito da equação C. 23 podem ser calculados pelas seguintes equações:

**a) Velocidade do ar,  $v_{ar}$**

Pela definição da velocidade mássica, a velocidade do ar pode ser determinado pela seguinte equação:

$$v_{ar} = \frac{G}{\rho} \quad \text{C.24}$$

onde a velocidade mássica,  $G$ , é constante e a densidade do ar,  $\rho$ , pode ser aproximada pela equação C.25, a qual tem como base a equação dos gases perfeitos:

$$\rho = \frac{M_w p}{RT} \quad \text{C.25}$$

a pressão  $p$  varia linearmente ao longo da conduta:

$$p = \left( \frac{\Delta p}{L} \right) L_i + p_{01} \quad \text{C.26}$$

onde a perda de carga por unidade de comprimento,  $\left( \frac{\Delta p}{L} \right)$ , é constante como é mostrado na secção 4.9.1.

**b) Diferença de pressão entre a base e o topo do frasco,  $(p_{bf} - p_{tf})$ :**

Como consequência da equação C.26, a diferença de pressão entre a base e o topo do frasco pode ser calculado pela seguinte equação:

$$(p_{bf} - p_{tf}) = - \left( \frac{\Delta p}{L} \right) \times L_f \quad \text{C.27}$$

c) *Coeficiente de arrasto,  $C_D$*  :

O  $C_D$  varia ao longo da conduta e pode ser aproximado utilizando a definição de esfericidade:

$$\psi = \frac{\text{Superficie\_esfera (com mesmo volume\_frasco)}}{\text{Superficie\_frasco}} \quad \text{C.28}$$

em que:

$$\text{Volume\_frasco} = \pi r^2 L,$$

$$\text{Superficie\_frasco} = 2\pi r L + 2\pi r^2$$

$$\text{Superficie\_esfera com o mesmo volume} = 4\pi \times \left[ \left( \frac{3 \times \text{Volume\_frasco}}{4\pi} \right)^{1/3} \right]^2$$

então:

$$\psi = \frac{6^{2/3} \pi (Lr^2)^{2/3}}{2\pi r L + 2\pi r^2} \quad \text{C.29}$$

Substituindo os valores do raio e da altura do frasco na equação anterior, obtém-se o valor de 0,79 para a esfericidade do frasco. De salientar que, para o cálculo da esfericidade a geometria do frasco foi aproximada à de um cilindro de raio  $r$  e altura  $L$ .

Tendo como base a Figura C.4, adaptou-se os valores do coeficiente de arrasto ao caso em estudo, obtendo-se as seguintes equações para o mesmo:

$$Re_{\text{frasco}} \leq 1, C_D = \frac{50}{Re} \quad \text{C.30}$$

$$1 < Re_{\text{frasco}} \leq 155, C_D = \frac{50,4}{Re_{\text{frasco}}^{0,65}} \quad \text{C.31}$$

$$Re_{\text{frasco}} > 155, C_D = 1,89 \quad \text{C.32}$$

Onde:

$$Re_{\text{frasco}} = \frac{\rho(v_{ar} - v)d_{\text{frasco}}}{\mu} \quad \text{C.33}$$

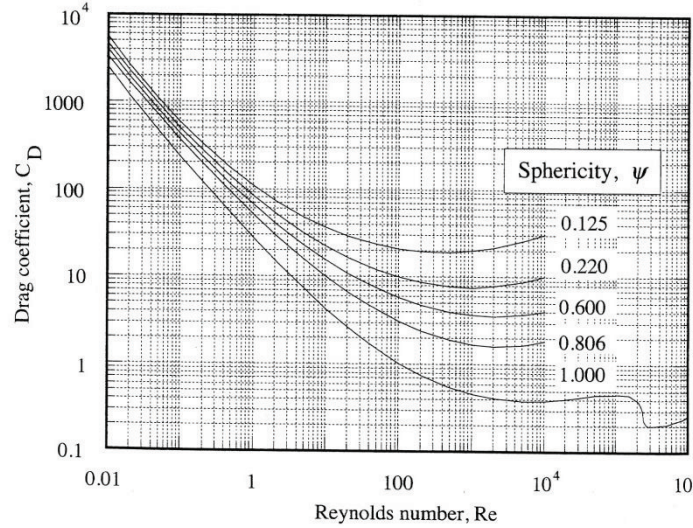


Figura C. 4 – Coeficiente de arrasto de objectos com diferentes valores de esfericidade [44].

Relativamente à Figura C.4, deve referir-se que o  $Re$  apresentado no eixo do  $xx$  corresponde ao  $Re_{frasco}$  apresentado nas equações anteriores.

**d) Força da gravidade,  $mg_L$ :**

A força da gravidade vai depender da posição do frasco na conduta, sendo que existem quatro situações distintas, tal como ilustra a Figura C.4:

- (1) Secção vertical, onde a força da gravidade é igual a  $mg_L$ ;
- (2) Secção horizontal, onde a força da gravidade é igual zero,
- (3) Secção diagonal, onde a força da gravidade é igual a  $mg_L \times \sin(30)$ ;
- (4) Secção horizontal, onde a força da gravidade é igual a zero.

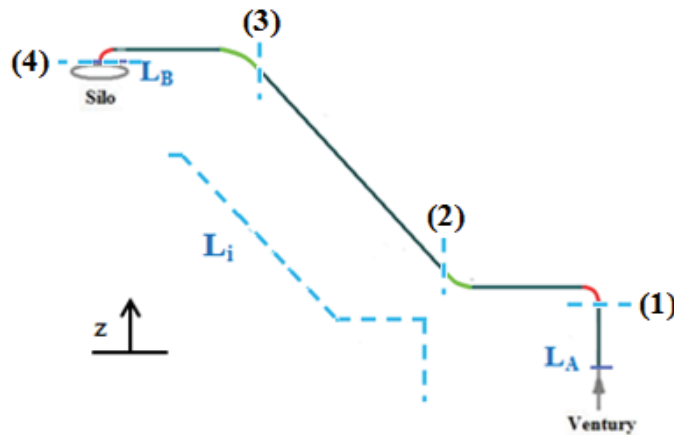


Figura C. 5 – Esquema da conduta de transporte dos frascos.

## ANEXO D

### ➤ Rotina em Matlab referente ao modelo para estimativa do tempo de transporte dos frascos

#### ✓ *calcT:*

```
function tempo=calcT(Cd)
L=39;
[z,ts]=ode45(@(z,t)tempodZ(z,t,Cd),[0.0001 L],0);

tempo=ts(end);

function taux=tempodZ(z,t,Cd);
    taux=1./velocity(z,Cd);
end
end
```

#### ✓ *Velocity:*

```
function v=velocity(z,Cd)

%Definição das constantes
m=9.5e-3;
R=8.3144;
G=27.20;
T=298.0;
dfrasco=47.6e-3;
Lfrasco=135.5e-3;

Af=(pi()/4)*(dfrasco^2);
Mw=28.96e-3;
DPDL=-76.91;
p01=101917;
p=p01-(DPDL*z);
ro=(p*Mw)/(R*T);

aux1=Af*DPDL*Lfrasco*z;
aux2=0.5*ro*Af*Cd*((G*R*T)/Mw)^2);
aux3=(1/(-DPDL*p01))-(1/(DPDL*(DPDL*z-p01)));
auxtotal=(2/m)*(aux1+(aux2*aux3));

v=sqrt(auxtotal);
end
```

#### ✓ *mfrasco:*

```
function dvdt = mfrasco(Li,v,CD)
if CD <=0
    usarCDCalculado = true;
else
    usarCDCalculado = false;
end
R = 8.3144;
T = 298.15;
Mw = 0.0289;
```

```
m = 0.00950;
Lf = 0.136;
rfrasco = 0.0476/2.0;
rtotal = 0.075/2.0;
Ap = 3.1415 * rfrasco^2;
G = 27.2;
grav=9.8;
DeltaPDL = -76.9;
pol = 101917;
p = DeltaPDL*Li + pol;
rho = p * Mw / (R*T);
var = G / rho;
fVolume = rtotal^2/(rtotal^2 - rfrasco^2);
varlateral = var*fVolume;
varlateral = var;
vRelativa = varlateral - v;
Rep = rho * vRelativa * (2.0* rfrasco)/(1.84e-5)
if usarCDCCalculado
    CD = CalcCD(Rep);
end
termo1 = Ap * (-DeltaPDL) * Lf;
termo2 = (1.0/2.0)*rho * CD * Ap*(vRelativa)^2.0;
termo3 = -m*grav*CalcF(Li);
dvdt = (termo1 + termo2 + termo3)/(m*v);

function oCD = CalcCD(Rep)
    if Rep <= 1.0
        oCD = 50.0/Rep;
    elseif (Rep > 1.0 && Rep<=190)
        oCD = 50.4/Rep^0.65;
    else
        oCD = 1.89;
    end
end

function oF = CalcF(Li)
    if Li <= 3.5
        oF = 1;
    elseif Li > 3.5 && Li <= 16.95
        oF = 0;
    elseif Li > 16.95 && Li <= 46.95
        oF = 0.5;
    else
        oF = 0.0;
    end
end

end
```

### ✓ *calcPerfilVel*

```
function [z, vel] = calcPerfilVel(L,CD)
    % integra equa 4.12 de 0 a L
    au=[0:0.1:3.5];
    bu=[3.5:1:16.95];
    cu=[16.95:1:46.95];
    du=[46.95:1:58.4];
    eu=[au,bu,cu,du]
    vo = 0.0+10*eps;
```

```

        res = ode45(@mfrasco,[eu L],vo,[],CD);
        z = res.x;
        vel = res.y;
end

```

### ✓ *CalcVel*

```

function vel = calcVel(L,CD)
% resolve equa~o 4.12
[z,vs]=calcPerfilVel(L,CD);
vel = vs(end);
end

```

### ✓ *CalcVarL*

```

function vdeAr = calVarL(Li)

R = 8.3144;
T = 298.15;
Mw = 0.0289;
m = 0.00950;
Lf = 0.136;
rfrasco = 0.0476/2.0;
rtotal = 0.075/2.0;
Ap = 3.1415 * rfrasco^2;
G = 27.2;
DeltaPDL = -76.9;
pol = 101917;
p = DeltaPDL*Li + pol;
rho = p * Mw / (R*T);
var = G / rho;
vdeAr = var;
end

```

### ✓ *deltaTempo*

```

function dt = deltaTempo(z,t,CD)
% resolve eq dt/dz = 1/v
if z == 0
    dt = 0;
else
    v = calcVel(z,CD);
    dt = 1.0/v;
end
% disp([z, dt])
end

```

### ✓ *CalcTempoTotal*

```

function tempoTotal = CalcTempoTotal()

tempos = zeros(5,1);
CDs = [0.4,0.56,1.0,1.5,1.89];

CD =CDs(1);
LB = 58.4;
% resolve eq dt / dL = 1/v para tempo !!!
res = ode45(@deltaTempo,[0.000001 LB],0,[],CD);
tempos(1) = res.y(end);

```



```
[z1,vs1]=calcPerfilVel(LB,CD);

CD = CDs(2);
LB = 58.4;
res = ode45(@deltaTempo,[0.000001 LB],0,[],CD);
tempos(2) = res.y(end);
[z2,vs2]=calcPerfilVel(LB,CD);

CD =CDs(3);
LB = 58.4;
res = ode45(@deltaTempo,[0.000001 LB],0,[],CD);
tempos(3) = res.y(end);
[z3,vs3]=calcPerfilVel(LB,CD);

CD =CDs(4);
LB = 58.4;
res = ode45(@deltaTempo,[0.000001 LB],0,[],CD);
tempos(4) = res.y(end);
[z4,vs4]=calcPerfilVel(LB,CD);

CD =CDs(5);
LB = 58.4;
res = ode45(@deltaTempo,[0.000001 LB],0,[],CD);
tempos(5) = res.y(end);
[z5,vs5]=calcPerfilVel(LB,CD);

LB=58.4;
res = ode45(@deltaTempo,[0.00001 LB],0,[],-1);
tempoCDVariavel = res.y(end);
fprintf('Tempo calc com CDvariavel =
%5.5f',tempoCDVariavel);
[z6,vs6]=calcPerfilVel(LB,-1);

zAr = 0:0.1:LB;
vAr = 0*zAr;
for i=1:length(zAr)
    vAr(i) = calVarL(zAr(i));
end

figure(1)
hold on
% plot(z1,vs1);
plot(z2,vs2,'c-.');
% plot(z3,vs3);
% plot(z4,vs4);
plot(z5,vs5,'k-*');
plot(z6,vs6,'b-');
plot(zAr,vAr,'g. ');
hold off

figure(2)
plot(CDs,tempos,'mo-');

end
```